

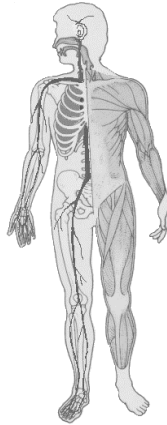
# **Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie**

Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten zur Steigerung  
des Interesses und für den fachübergreifenden Physikunterricht

Dissertation der Fakultät für Physik  
der  
Ludwig-Maximilian-Universität München

vorgelegt von  
Giuseppe Colicchia  
aus Rom / Italien

München 2002



# **Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie**

Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten zur Steigerung  
des Interesses und für den fachübergreifenden Physikunterricht

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Physik  
der LMU – München

von  
Giuseppe Colicchia  
aus Rom/Italien

München 2002

- 1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. H. Wiesner**
- 2. Gutachter: Prof. Dr. U. Harms**

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2002

## Kurzfassung

Eines der dringend zu lösenden Probleme des Physikunterrichts stellt das im Vergleich zu anderen Schulfächern geringe Interesse der Schüler und insbesondere Schülerinnen dar. Mangelnde Lernmotivation führt langfristig zu geringeren Lernerfolgen und zu einem Desinteresse an naturwissenschaftlichen Fragen als Erwachsener.

Inzwischen gibt es eine Reihe von Untersuchungen über das Interesse von Schülerinnen und Schülern die zeigen, dass medizinische und biologische Themen auf relativ hohes Interesse stoßen. Von diesen Befunden ausgehend wurden für eine Reihe von medizinischen Themen Unterrichtseinheiten entwickelt und ihre Wirksamkeit bezüglich einer Interessensserhöhung überprüft.

Folgende biologisch-medizinische Kontexte für die Einführung bzw. Anwendung physikalische Begriffe und Gesetze wurden ausgewählt:

- Anhand des menschlichen Bewegungsapparates (Armgelenk, Kauapparat und Belastung der Wirbelsäule) wurden Begriffe wie Hebel und Drehmoment sowie Schwerpunkt erklärt.
- Normale Atmung und Atmung beim Tauchen wurden zur Einführung des Luftdrucks verwendet. Weiterhin wurden physikalische Aspekte von Störungen im Blutkreislauf (Thrombose, Stenose, Aneurysma) betrachtet, um Begriffe und Gesetze aus der Hydrostatik und Hydrodynamik zu behandeln.
- Einfache Untersuchungen am Auge, sowie die Behandlung der wichtigsten Fehlsichtigkeiten in Verbindung mit der Anatomie und Physiologie des menschlichen und tierischen Auges werden thematisiert. Hierbei standen die Akkommodationsformen in Luft und Wasser im Vordergrund.

Den am Unterrichtsversuch beteiligten Lehrkräften wurden Materialsammlungen zur Verfügung gestellt. Die Unterrichtsvorschläge waren nicht bis ins letzte Detail ausgearbeitet, sodass die Lehrkräfte einen relativ großen Spielraum bei der Unterrichtsgestaltung hatten. Dies entspricht u.E. einer weitgehend realitätsnahen Verwendung von Vorschlägen durch die Lehrkräfte.

Zur Veranschaulichung und Unterstützung der Themen wurden viele, auf die Grundfunktionen reduzierte Modelle gebaut und für die Erprobung zur Verfügung gestellt.

Mit Hilfe einer Reihe von Fragebögen wurden die Einstellung der Lehrkräfte zu den unterrichteten Themen und das allgemeine Interesse der Schülerinnen und Schülern an Physik, sowie die Interessantheit des Unterrichts untersucht.

Die *Lehrerbefragung* ergab, dass die neuen Unterrichtskonzeptionen, mit dem Ziel das Interesse an den Gegenständen der Physik durch eine explizite Berücksichtigung biologisch-medizinischer Kontexte zu erhöhen, bei den Lehrkräften auf hohe Akzeptanz stoßen. Nach ihrer Einschätzung vergrößert der Bezug zur medizinischen Fragestellung sowohl für sie selbst als auch für die Schüler das Interesse am Physikunterricht.

Vor- und Nachtest-Vergleiche ergaben eine Erhöhung des *allgemeinen und des Fachinteresses* in der Versuchsgruppe und eine Abnahme in der Kontrollgruppe.

Eine Überlegenheit der Versuchsgruppe gegenüber der Kontrollgruppe bei der *Interessantheit* des Unterrichts konnte nicht nachgewiesen werden.

In einigen Klassen wurden Leistungstests mit traditionellen Aufgaben geschrieben. Die Ergebnisse können so interpretiert werden, dass die *Lernleistung* der Versuchsgruppe in Physik nicht schlechter ausfiel als im traditionellen Unterricht. Allerdings haben die Schüler auch etwas in der Biologie und Medizin dazu gelernt.

Der geschlechtsspezifische Vergleich zeigt, dass besonders die Mädchen bezüglich des Interesses von dem Konzept profitieren.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse so zu interpretieren, dass mit der Einbindung physikalischer Inhalte in biologisch-medizinische Kontexte das Interesse der Schülerinnen und Schüler wie angenommen gesteigert werden kann, ohne dass die Lernleistung darunter leidet.



# Inhaltsverzeichnis

## 1. Einleitung 3

### 1.1. Ziel der Arbeit 4

## 2. Das Interesse 5

### 2.1. Motivation und Interesse 5

### 2.2. Was ist Interesse ? 6

### 2.3. Interesse und seine Entstehung 7

### 2.4. Interesse und Lernerfolg 9

### 2.5. Interesse der Schüler an Physik 10

## 3. Medizinischer Kontext 12

### 3.1. Zur Auswahl des medizinischen Kontextes 12

### 3.2. Bedingungen zur Förderung des Interesses 13

### 3.3. Zweckmäßigkeit von medizinischen Kontexten 15

## 4. Vorgeschlagene Themen 16

### 4.1. Drehmomentgleichgewicht bei Lebewesen 17

#### 4.1.1. *Statik des menschlichen Arms* 20

##### A. Basiswissen über das Gleichgewicht am menschlichen Arm 20

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 22

#### 4.1.2. *Statik des Kauapparates* 26

##### A. Basiswissen über Anatomie und Statik von Unterkiefern 26

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 29

#### 4.1.3. *Belastung der Wirbelsäule* 33

##### A. Basiswissen über die Statik der Wirbelsäule 33

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 39

### 4.2. Der Blutkreislauf 44

#### 4.2.1. *Schweredruck* 58

##### A. Basiswissen über Blutdruckverhältnisse im Körper 48

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 52

#### 4.2.2. *Flussstörungen im Blutkreislauf* 57

##### A. Basiswissen über Blutstrom und Gefäßverstopfung 57

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 64

### 4.3. Umgebungsdruck und Atmungsstörungen 67

##### A. Basiswissen über die Atmungsmechanik 67

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 73

### 4.4. Das Auge 82

#### 4.4.1. *Fehlsichtigkeiten* 86

##### A. Basiswissen über die Augenrefraktion 86

##### B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 89

#### 4.4.2. *Untersuchungen des Augenhintergrundes* 97

##### A. Basiswissen über Augenspiegel und Ophthalmoskopie 97

- B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 100
- 4.4.3. *Sehen unter Wasser* 102
  - A. Basiswissen über Fischeaugen und deren Akkommodation 102
  - B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung 105

#### 4.5 Weitere einsetzbare Themen 109

- 4.5.1. *Das Stethoskop* 109
  - A. Basiswissen über Stethoskop und Herztöne 109
  - B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung 111
- 4.5.2. *Körpertemperatur und Wärmeübertragung* 113
  - A. Basiswissen über Wärmehaushalt und Körpertemperatur 113
  - B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung 121
- 4.5.3. *Venöse Infusionen* 126
  - A. Basiswissen über Infusionsgeräte und Infusionsströmung 126
  - B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung 129
- 4.5.4. *Die Skiaskopie* 135
  - A. Basiswissen über Beleuchtung der Netzhaut und Erscheinungen an der Pupille 135
  - B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung 139

### 5. Evaluation 144

#### 5.1. Methode 144

#### 5.2. Ergebnisse 147

- 5.2.1. Zur Durchführung der Unterrichtseinheiten 147
- 5.2.2. Einstellung der Lehrer 150
- 5.2.3. Änderung des Interesses 152
  - 5.2.3.1 *Fachinteresse* 152
  - 5.2.3.2 *Allgemeines Interesse* 156
  - 5.2.3.3 *Interessantheit* 160
  - 5.2.3.4 *Bedeutung der Physik* 163
- 5.2.4. Wirkung auf den Lernerfolg 165
  - 5.2.4.1 *Lernerfolg in Mechanik* 165
  - 5.2.4.2 *Lernerfolg in Optik* 168

#### 5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion 170

### Literaturverzeichnis 173

# 1 Einleitung

In allen Teilbereichen seines Lebens ist der Mensch abhängig von Vorgängen, denen die Physik zugrunde liegt. Man müsste daher eigentlich erwarten, dass die Schüler ein großes Interesse für das Fach Physik hätten. Doch zeigen die meisten Schüler und insbesondere die Schülerinnen kein oder nur ein geringes Interesse an diesem Schulfach [Hoffmann (1990); Gunnacker (1998); Jung (1992); Lechner (1991); Rosenthal (1995)]. Das Interesse für das Fach sinkt wie in vielen anderen Schulfächern im Laufe der Schulzeit. Im Falle der Physik sinkt es besonders eklatant. Auch spezifische Interessen, die aus verschiedenen Gründen bei den Schülern vorhanden sind, verlieren sich oft während des Physikunterrichts.

Es erhebt sich daher die Frage, ob im Unterricht nicht etwas Grundsätzliches fehlt. Wahrscheinlich liegen die Ursachen der Ablehnung des Physikunterrichts auch in der Unterrichtsqualität bzw. darin, dass der Unterricht nicht den Erwartungen der Schülerinnen und Schüler entspricht. Dieses Fach ist angeblich schwierig und mit Lehrstoff überladen, es ist nach Meinung der Schüler auch „trocken“, zu abstrakt und wird zu lebensfern unterrichtet [Häußler et al. (1983); Woolnough (1994)]. In der Tat stammen die meisten Beispiele, die im Unterricht gebracht werden, aus der Technik oder der Physik selbst ohne direkte Verbindung mit anderen Wissenschaftsgebieten.

Die vorherrschende Meinung ist, dass die unterrichteten Themen direkt die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler betreffen müssen, damit der Lehrstoff für sie eine Bedeutung bekommen kann. Viele Vorschläge gehen daher in die Richtung, den Lerngegenstand in einen größeren Bezug zum Alltag zu setzen [Duit (1999); Berge (2000); Rößler (2000)].

Die Schülerinnen und Schüler zeigen mehr Interesse am Physikunterricht, wenn Themen behandelt werden, die einen gewissen Lebensbezug beinhalten und die Schülerinnen und Schüler erkennen lassen, dass sie dieses Wissen auch nützen können [Häußler & Hoffmann (1995)]. Möglich sind Themen, die ganz einfache Dinge des alltäglichen Lebens betreffen oder aktuelle, gesellschaftsrelevante Themen. Weiterhin stoßen Themen über den menschlichen Körper im Physikunterricht auf großes Interesse. Die Physik des menschlichen Körpers ist bei den Schülerinnen und Schülern sehr beliebt, weil sie ihren Körper besser kennenlernen können und dies schließlich große Bedeutung für ihr eigenes Leben hat. Deswegen müsste man die Bedeutung der Physik für die „life sciences“ z. B. Biologie und Medizin stärker hervorheben, damit durch mehr Lebensnähe eine höhere Akzeptanz und Lerneffektivität erreicht werden kann.

Es darf nicht verwundern, dass medizinische Themen wenig Eingang in die Schulphysik gefunden haben, weil sie meist völlig in der Physiklehrerausbildung fehlen. Auch in den Schulbüchern sind die wenigen Beispiele dünn gesät, so werden sie z. B. manchmal nur als Anwendung am Ende eines Kapitels genannt.

Es scheint daher wichtig zu erfahren, ob medizinische Themen, die in der Schule bisher kaum Einzug hielten, als didaktische Hilfe bzw. als Lerngegenstand den Physikunterricht verbessern können.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll zu folgenden Fragestellungen Beiträge liefern:

**a) *Lernmotivation:***

Lernprobleme von Schülerinnen und Schüler lassen sich oft auf mangelnde Lernmotivation zurückführen. Es geht um die Frage, ob medizinisch-physikalische Themen im Physikunterricht die Motivation fördern können.

**b) *Entwicklung von Unterrichtseinheiten:***

In den Schulbüchern der Physik werden bisher wenige Bezüge zu medizinischen und biologischen Gebieten hergestellt. Auch in den fachdidaktischen Veröffentlichungen in Zeitschriften sind nur wenige Vorschläge dazu zu finden. Meist sind diese zudem schwer im Unterricht umsetzbar, so dass sie wenig Verwendung bei den Lehrerinnen und Lehrern finden. Es besteht also die Nachfrage nach geeigneten, medizinischen und biologischen Themen, die didaktisch begründet und methodisch aufbereitet sind, damit interessierten Lehrerinnen und Lehrern detailliertes Unterrichtsmaterial (Lehrtext, Aufbau von Modellen, Versuchsanordnungen u. a.) zur Verfügung steht.

Die Unterrichtseinheiten müssen folgenden Bedingungen genügen:

- Sie sollen sich unter normalen schulischen Anforderungen (Lehrpläne, Unterrichtsorganisation, verfügbares Material u.s.w.) sowie mit einem Lehrer, der auch nur ein normales medizinisches Wissen besitzt, erfolgreich unterrichten lassen.
- Die Themen in den Unterrichtseinheiten müssen so elementarisiert sein, dass sie für die Schülerinnen und Schüler verständlich sind, aber noch fachlich zulässig.
- Sie sollen im Sinne eines Baukastensystems an die spezifische Unterrichtssituation angepasst werden.
- Sie dürfen auch kurzfristig nicht zu geringeren Lernleistungen führen.
- Das Experimentations- und Demonstrationsmaterial soll mit möglichst einfachen, allen Lehrkräften im Prinzip zugänglichen Mitteln, herstellbar sein. So weit wie möglich sind Schülerversuche vorzusehen.

**c) *Evaluation:***

Die Erprobung der Unterrichtsmaterialien erfolgt weitgehend unter „Normalbedingungen“ in der Schule. Zu untersuchen sind die Fragen:

- Läuft der Unterricht gut in der Organisation? Sind z.B. die Experimente durchführbar und von allen Schülern beobachtbar?
- Wie ist die Einstellung der Lehrer gegenüber einem auf diese Weise geänderten Unterricht? Sind die Lehrer von einem Physikunterricht mit medizinischem Kontext positiv überzeugt?
- Sind Schülerinnen und Schüler interessierter an einem Unterricht mit dem Kontext „Physik und Medizin“ im Vergleich zu einem traditionellen Unterricht über den gleichen physikalischen Inhalt?
- Ändert sich das Interesse an Physik?
- Wie sind die kurzfristigen Auswirkungen auf den Lernerfolg in Physik?

## 2 Das Interesse

Für Dinge oder Beschäftigungen, die uns interessieren, sind wir bereit eine Menge zu tun: Zeit zu opfern, Anstrengungen zu unternehmen und manchmal sogar keine Kosten und Mühen zu scheuen, um einer bestimmten Beschäftigung nachzugehen oder um tiefer in eine bestimmte Materie einzutauchen. Das Interesse ist sozusagen unser innerer Motor, unser Antrieb, für die gesetzten Aktivitäten [siehe z.B. Krapp & Prenzel (1992)].

Es wäre schön, diesen inneren Motor auch für die Schule in Gang zu setzen. Interessieren die Schüler sich für ein bestimmtes Thema, so sind sie im Allgemeinen aufmerksamer, aufnahmefähiger, aktiver und sie stören auch seltener den Unterricht.

Nachdem das Interesse so bedeutend für den Lernerfolg zu sein scheint, wird der Frage nachgegangen, was man unter Interesse versteht, welche Auswirkung es auf das Lernen hat und wie das Interesse der Schüler und insbesondere der Schülerinnen im Physikunterricht geweckt, weiterentwickelt bzw. aufrechterhalten werden kann.

### 2.1 Motivation und Interesse

Es gibt noch keine umfassende Theorie über Motivation und Interesse und sie kann auch nicht einfach gegeben werden, weil menschliches Handeln auf eine Vielzahl von Voraussetzungen, Bedürfnissen und Begründungen zurückzuführen ist. Jede Theorie bietet eine mehr oder weniger nachvollziehbare und verständliche Erklärung.

Man unterscheidet normalerweise zwei Arten der Lernmotivation: Die intrinsische und die extrinsische Lernmotivation:

- Unter der intrinsischen Motivation versteht man im Wesentlichen die selbstbestimmte Motivation, das Lernen aus eigenem Antrieb, aus Interesse um der Sache willen, aus dem Streben nach Selbstverwirklichung und aus dem Streben seinen Talenten nachzugehen.
- Extrinsische Motivation heißt fremdbestimmte Motivation. Der Anreiz zum Lernen hat nichts mit der Sache per se zu tun und würde z. B. zutreffen, wenn jemand etwas macht nur weil eine Strafe droht oder weil es sich gehört [Wegge (1998)].

Durch die selbstbestimmte Lernmotivation geht der Schüler in seiner Sache auf. Er verspürt Freiheit, ist neugierig, handelt spontan und ist offen für Neues. Das Lernen macht Spaß.

Lernen aufgrund eines äußeren Drucks (Eltern, Prüfung, Versprechen einer Belohnung etc.) wird nur als Pflicht und nicht als Vergnügen angesehen. Der Schüler ist für Neues nicht offen. Er lernt nur das notwendige Minimum. Oft scheinen für ihn nicht die Inhalte wichtig zu sein, sondern dass man zu einem bestimmten Zeitpunkt genug weiß, um eine gute Note zu erhalten. Es ergibt sich ein Lernen für die Prüfung. Hierin liegt die Gefahr für eine prinzipielle Gleichgültigkeit gegenüber den Inhalten oder auch die Gefahr, dass Schüler für kurzfristige, äußere Anforderungen lernen (z. B. prüfungstaktisch „ökonomische“ Lernstrategie), die den nachschulischen Anforderungen nicht mehr entsprechen. Der Aufbau einer Wissensstruktur, die bereits Gelerntes mit neuem Wissen verknüpft und so die Basis bildet, Schulwissen auch auf Alltagsprobleme anzuwenden, wird dadurch im Allgemeinen gehemmt. Allerdings kann in Ausnahmefällen das Lernen durch fremdbestimmte Motivation den Vorteil haben, dass wichtige Sachen, die nicht interessant zu sein scheinen, gelernt werden.

Das Interesse wird sowohl als wichtige Bedingung für das Auftreten intrinsischer Motivation als auch als eine Motivkraft angesehen, die auf einen bestimmten Gegenstand gerichtet ist, wobei vor allem relevant ist, welche Tätigkeiten der Interessierte in Bezug zu diesem Gegenstand ausübt. Gerade durch das Ausführen der entsprechenden Tätigkeiten eignet sich der

Interessierte Wissen an, welches ihm Kompetenz verleiht und ein Erfolgserlebnis gibt. Das Erfolgserlebnis löst wiederum eine weitere Motivation aus und verstärkt das ursprüngliche Interesse. Intrinsische Lernmotivation fördert das Lernen, das wiederum (z.B. durch Steigerung des Selbstvertrauens in die eigene Lernleistungsfähigkeit) die intrinsische Motivation verstärkt. Die Steigerung des Selbstvertrauens bewirkt, dass der äußere Druck durch extrinsische Motivation als geringer empfunden wird [Prenzel (1995)]. Die extrinsische Lernmotivation kann eine positive oder negative Wirkung auf die intrinsische Motivation sowie auch auf das Interesse bewirken:

Wenn jemand gezwungen wird, etwas zu lernen, so kann es auch passieren, dass er Gefallen an dem Gegenstand findet und er von diesem Zeitpunkt an intrinsisch motiviert ist. Umgekehrt kann es vorkommen, dass Lernmotivation oder Interesse z. B. durch eine schlechte Unterrichtsqualität verloren geht.

Manche Wissenschaftler [z. B. Heckhausen (1989)] messen der intrinsischen Motivation bzw. dem Interesse keine große Bedeutung bei, weil Verhalten ihrer Meinung nach im Wesentlichen durch äußere Reize (wie z. B. soziale Anerkennung) in Gang gesetzt und aufrecht erhalten wird. Demgegenüber stehen Theorien, dass die Handlungsveranlassung bzw. –aufrechterhaltung nicht durch externe Reize induziert wird, sondern die Anreize der Handlung selbst motivierend wirken [z. B. Deci & Ryan (1985)].

Es scheint die intrinsische erfolgreicher als die extrinsische Motivation zu sein. Tatsächlich wünschen und fordern die Schüler motivierende, intrinsische Lernbedingungen. Nun zeigt aber die Realität, dass manches getan oder gelernt werden soll, was schwierig intrinsisch motiviert werden kann. Deswegen freuen sich auch die Lehrer über intrinsische Lernmotivation, aber nur dann, wenn sie bei den Schülern vorliegt und sich genau auf das bezieht, was unterrichtet werden soll.

## 2.2 Was ist Interesse?

Das seit dem 15. Jahrhundert bezeugte Fremdwort geht zurück auf das lateinische *inter-esse* „dazwischen sein, dabei sein, teilnehmen, von Wichtigkeit sein“. Es erscheint dann im Mittellateinischen im Rechtswesen mit der Bedeutung „Zinsen“ für den Schuldner und „Gewinn, Nutzen, Vorteil“ für den Gläubiger. Die von einer Grundbedeutung „geistige Teilnahme“ ausgehende Bedeutung „Aufmerksamkeit, Neigung“ entwickelte sich erst im 18. Jahrhundert unter dem Einfluss des französischen *intérêt*. Auf diese Grundbedeutung stützen wir uns auch, wenn wir heute den Begriff „Interesse“ als „Vorliebe, Aufmerksamkeit, Neugierde für etwas“ verwenden.

Auch in der Psychologie und Pädagogischen Psychologie hat der Begriff „Interesse“ keine eindeutige Bedeutung und daher ist es wichtig, diesen Begriff zu diskutieren und zu definieren.

Das Interesse beschreibt in der Pädagogik die Art und Weise und die Qualität des Verhältnisses von der Person zu einem Gegenstand, im engeren Sinne von dem Lernenden zum Lerngegenstand [Lehrke (1988)]. Ursprünglich hat man Interesse in der Psychologie und in der angewandten Psychologie sehr vielseitig gesehen. Im Wesentlichen gibt es aber zwei Ansätze, wie Interessen verstanden werden. Einerseits als relativ konstante Dispositionen oder „traits“, wie es in verschiedenen Persönlichkeitstheorien geschieht, als quasi Persönlichkeitsmerkmale, die das ganze Leben andauern (individuelle Interessen). Andererseits – vor allem in der pädagogischen Psychologie – wird Interesse als ein aktueller Zustand gesehen, der sich aus besonderen Anreizbedingungen der Umgebung ergibt (situationales Interesse).

Trotz der uneinheitlichen Sichtweisen, lassen sich einige Merkmale des Interesses benennen, die mehr oder weniger unumstritten zu sein scheinen und die schon Rubinstein [Die Interessen, in Thomae (1965)] ausgedrückt hat:

„Das Interesse ist eine Tendenz oder Gerichtetheit der Persönlichkeit, die in der Konzentration der Gedanken und Absichten der Persönlichkeit auf einem bestimmten Gegenstand besteht. Dadurch wird ein Streben hervorgerufen, den Gegenstand näher kennen zu lernen, tiefer in ihn einzudringen und ihn nicht aus den Augen zu verlieren.“

Demnach ergeben sich vier wichtige Merkmale der Interessen:

- der Bezug zu Gegenständen oder Inhalten
- die Gerichtetheit der Gedanken und Absichten
- die Anregung von Tätigkeiten
- die emotionale Komponente.

Der oben angesprochene Person-Gegenstandsbezug ist fundamental für die darauf folgenden Theorien über das Interesse. In einer der wichtigsten Theorien, der Interessentheorie von Schiefele und Mitarbeitern [Schiefele & Prenzel (1983)] wird festgelegt, dass man das Interesse immer als eine Beziehung zwischen einer Person und einem ganz bestimmten Gegenstand sieht.

Ein weiteres Merkmal für die Definition des Interesses, und damit auch eine weitere Spezifizierung, soll zum Ausdruck bringen, dass nicht alle unsere Aktivitäten aufgrund irgend eines Interesses geschehen. Es sollen nur jene Interessen betrachtet werden, die zu kognitiven Aktivitäten führen, das heißt auf Erkenntnisgewinn, Informationsbeschaffung oder auch Lernen abzielen [Lehrke (1988)].

## 2.3 Interesse und seine Entstehung

In Deutschland gibt es in der Interessenforschung vor allem zwei Theorien, die in den letzten Jahrzehnten die Forschung prägten. Dies sind einerseits der differentialpsychologische Ansatz von E. Todt, sowie die Interessentheorie von U. Schiefele und Mitarbeitern. Vor allem letztgenannte Gruppe ist relevant, denn sie beschäftigten sich mit der Entwicklung eines Motivationskonzepts, welches eng an die pädagogischen Anforderungen und Zielvorstellungen gekoppelt ist. Man spricht daher auch von der „Pädagogischen Interessentheorie“. Dieser Ansatz wurde von Krapp und Prenzel weiter ausgebaut.

### *Interessentheorie von Todt*

Todt versteht Interessen in seiner Arbeit „Das Interesse“ (1978 & 1993) als Verhaltens- oder Handlungstendenzen (Dispositionen), die relativ überdauernd und relativ verallgemeinert sind, deren Herausbildung eng mit der Entwicklung des Selbstbildes gekoppelt ist, die gerichtet sind auf verschiedene Gegenstands-, Tätigkeits- oder Erlebnisbereiche und die geschlechtsspezifisch sind.

Todt setzt sich eingehend mit Methoden der Interessenerfassung, der Struktur der Interessen und der Entstehung der Interessen auseinander. Vor allem der Interessengenese ist ein großes Kapitel gewidmet, in dem die zahlreichen Theorien der Entstehung von Interessen in zeitlicher Reihenfolge abgehandelt worden sind, mit dem Schluss, dass es noch keine endgültige Entscheidung für eine bestimmte Konzeption der Interessengenese gibt, vor allem weil es noch an empirischen Untersuchungen fehlt.

Ein paar Gedanken dieser dort dargestellten Theorien sind hier aufgegriffen: So haben sich die Wissenschaftler zunächst überlegt, ob Interessen angeboren sind oder ob sie erlernt werden. Nun, sagt man zwar, dass man sein Interesse an etwas entdeckt hat oder dass man Interessen in einer Person wecken kann, was darauf hindeuten würde, dass Interessen in der menschlichen Natur gegeben sind. Man beobachtet, dass ein Kind im Laufe seiner Entwicklung aus verschiedenen Objekten und Tätigkeiten immer wieder bestimmte Gegenstände auswählt und sich wiederholt, gerne und zwar ohne äußere Veranlassung mit denselben Gegenständen auseinandersetzt. Jedoch ist auch zu überlegen, dass diese Interessen nur dann entwickelt werden können, wenn dem Kind genügend viele verschiedene Objekte und Tätigkeiten angeboten werden, aus denen es auswählen kann. Diese Überlegung führte zu dem Ansatz,

dass - genau umgekehrt - das Kind aus der Konfrontation mit verschiedenen Gegenständen positive oder negative Affekte erlebt und sich daraus Sympathien (Interesse) oder Aversionen gegenüber dem Gegenstand entwickeln (erlernt nach dem Paradigma des klassischen Konditionierendes). Ein Kind kann sich aber auch deshalb einer Tätigkeit häufiger zuwenden, weil diese Tätigkeit aufgrund vorhandener Talente besser gelingt und es dafür mehr Lob erntet, was wiederum eine noch intensivere Auseinandersetzung mit dem Gegenstand bewirkt (erlernt über die Bedingungen des instrumentellen Lernens).

Eine weitere Theorie besagt, dass Interessen keine Lerngeschichte haben, sondern Instrumente der Befriedigung grundlegender Bedürfnisse, wie das Bedürfnis nach Anerkennung oder Sicherheit, sind.

Ein weiterer Ansatz ist, dass Interessen einfach Persönlichkeitsorientierungen sind, die auf allgemeine Erfahrungen in der frühen Kindheit zurückgehen.

Die letzte der von Todt aufgezählten Theorien sieht Interessen als Effekte kognitiver Vorgänge an, die eng mit dem Geschlecht, dem Alter und dem berufsbezogenen „Selbstbild“ zusammenhängen und wesentlich durch die mit diesen Selbstbildern verbundenen Bewertungen von Tätigkeiten und Objekten bestimmt sind.

### *Pädagogische Interessentheorie*

Krapp [Krapp & Prenzel (1992)] stellt ein Modell, ein „Interessenskonstrukt“ auf, das Interessen und ihre Wirkungen (Effekte) betrachtet. Auch er geht davon aus, dass zur Interpretation des Interesses im Wesentlichen zwei unterschiedliche Konzepte verwendet werden. Die beiden Konzepte werden als (1) individuelle Interessen und (2) als situationale Interessen (Interessantheit) bezeichnet.

- (1) Die individuellen Interessen sind eben jene, oben schon angesprochenen, persönlichen Vorlieben für ein bestimmtes Wissens- oder Handlungsgebiet und sind relativ stabile Präferenzen für einen bestimmten Gegenstand.
- (2) Hingegen kann Interesse auch als ein einmaliger Zustand gesehen werden, der aus besonderen Anreizbedingungen einer Lernsituation hervorgeht. Dieses situationale Interesse ist nicht abhängig vom Vorhandensein persönlicher Präferenzen einer Person für einen bestimmten Gegenstand, sondern von äußeren Faktoren, die eine besondere Aufmerksamkeit der Person für eine Sache nach sich ziehen. Beim situationalen Interesse spielen die Anreizbedingungen der Umgebung für die Interessiertheit einer Person eine ausschlaggebende Rolle und weniger die in der Person verankerten individuellen Interessen.

Für die Schule würde das bedeuten, dass man den Unterricht für die Schüler interessanter gestalten könnte, indem man im Lerngegenstand bzw. in der Lernumgebung interesseauslösende Bedingungen schafft. Dies können Themen sein, die aufhorchen lassen, persönliche Erlebnisse des Lehrers, die Spannung erzeugen, oder Erzählungen, die eine Identifikation mit einer Leitfigur ermöglichen.

Individuelles und situationales Interesse sind keine voneinander klar abtrennbaren Konzepte, sie bilden ein Interessenkonstrukt, so Krapp, das die besondere Beziehung einer Person zu einem Gegenstand (Inhalt, Thema, Fachgebiet) beschreibt.

Eine vermittelnde Zusammenstellung der verschiedenen Motivationsformen wurde von Prenzel [in Lompscher (1996)] gegeben. Er greift auf die Motivationstheorie von Deci & Ryan zurück, verbindet diese mit einigen Überlegungen in Richtung der *Pädagogischen Interessentheorie* und gelangt zu sechs Varianten von Lernmotivation (Bild 2.3.1).



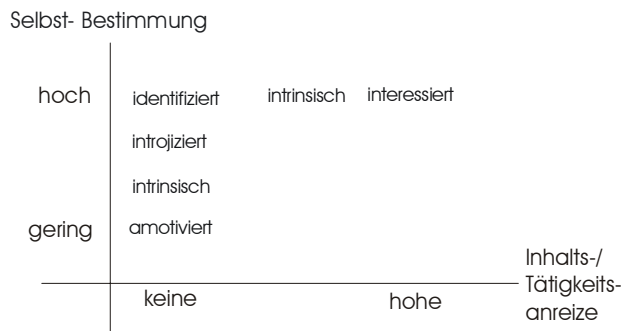


Bild 2.3.1: Sechs Ausprägungen von Lernmotivation (nach Prenzel)

Eine Dimension betrifft das angesprochene Ausmaß an Selbstbestimmung beim Lernen. Die andere Dimension betrifft das Vorhandensein von inhaltspezifischen Anreizen, die in der Sache selbst oder in darauf bezogenen Tätigkeiten von der lernenden Person wahrgenommen werden.

Als „*amotiviert*“ bezeichnet man den Zustand ohne Lernmotivation, die Person ist völlig gleichgültig und orientierungslos. „*Extrinsisch*“ motiviert bedeutet, wie oben schon gesagt, dass das Lernen nur unter äußerem Druck erfolgt und fremdbestimmt ist. „*Introjizierte*“ Lernmotivation kommt auch durch äußeren Druck zustande, der jedoch bereits in die Person selbst hinein verlegt wurde, die Person zwingt sich selbst zum Lernen. Beim „*identifiziert*“ motivierten Lernen findet die Person zwar den Lerngegenstand wenig reizvoll, er scheint aber aus anderen, subjektiven Gründen für die Person wichtig, deshalb spricht man in diesem Fall schon von selbstbestimmt motiviertem Lernen. Wenn aber die Person in der Sache selbst Anreize findet und sich dieser Sache freiwillig, also ohne Ausüben eines äußeren Drucks, zuwendet, so spricht man von „*intrinsischer*“ Motivation. „*Interessiert*“ betrifft eine besondere Form intrinsisch motivierten Lernens, wobei die Person von einem Gegenstand so fasziniert oder gepackt ist, dass sie sich gerne und wiederholt mit diesem auseinandersetzt.

Die identifizierte, intrinsische und interessierte Variante sind Formen mit hoher Selbstbestimmung. Davon hat die interessierte Lernmotivation die meisten Inhalts- und Tätigkeitsanreize.

## 2.4 Interesse und Lernerfolg

Schon früh haben Pädagogen die entscheidende Bedeutung des Interesses im Unterricht erkannt. So heißt es in einem älteren Handbuch der Pädagogik etwa: „Je mehr uns ... eine Sache interessiert, desto aufmerksamer fassen wir sie auf; Je aufmerksamer wir sie aber auffassen, desto sicherer haftet sie im Gedächtnis“ [nach Sauer, aus Lehrke (1988)]. So soll Interesse erstens dazu dienen, Lernen zu fördern und zweitens die Lernmotivation zu verstärken, denn höhere Lernleistungen seien „ohne intensive Lernmotivation und ohne eigenes Interesse undenkbar“.

Jeder wird wohl vermuten, dass Interessen im allgemeinen auf das Lernen und damit auf die Schulleistung positiven Einfluss haben. Das ist auch meist der Fall, denn die Interessenshandlung ist mit positiven Gefühlen verbunden (z. B. fühlt sich der Schüler frei von äußeren Zwängen) und äußert sich in einer erhöhten Aktivierung und Konzentration. Ein starkes Interesse kann aber zu schlechteren Leistungen führen, wenn es von relevanten Aspekten ablenkt. Differenziert man zwischen individuellem und situationalem Interesse, so wurde festgestellt, dass das individuelle Interesse im allgemeinen zu größeren Lernleistungen führt [Schiefele et al. (1993)], während Belege fehlen, dass ein situationales Interesse immer zu einer erhöhten Lernleistung führt.

Krapp versucht den Zusammenhang zwischen Interesse und den Auswirkungen des Interesses auf die Lernleistung, die er als Interesseneffekte bezeichnet, zu erklären, indem er der Frage nachgeht, wie diese Effekte zustande kommen [Krapp & Prenzel (1992)]. Krapp unterscheidet bei den Interesseneffekten zwischen zwei Kategorien. Bei der ersten Kategorie wird die Auswirkung auf die kognitive Wissensstruktur (Qualität und Quantität des Wissens) betrachtet.

Bei der zweiten wird die Auswirkung des Interesses auf traditionelle schulische Leistungskriterien, wie z.B. durch objektive Verfahren (Tests) oder subjektive Einschätzungen (Lehrerurteile, Noten) ermittelt, um eben dem Problem Rechnung zu tragen, dass in schulischen Tests häufig nicht die Qualität der Wissensstruktur gemessen wird [Krapp & Prenzel (1992)].

Die stärkste Korrelation wird zwischen individuellem Interesse und der kognitiven Wissensstruktur (vor allem Qualität des Wissens, z. B. hinsichtlich der Fähigkeit das Wesentliche zu erkennen oder Zusammenhänge mit anderen Bereichen herzustellen) beobachtet. Hohe Korrelation gibt es auch zwischen individuellem Interesse und der bewerteten Lernleistung. Die Höhe der Korrelation ist aber noch von anderen Faktoren abhängig, wie z.B. vom Geschlecht oder vom Alter. Im allgemeinen wird eine höhere Korrelation bei Jungen und bei höheren Klassenstufen festgestellt.

Interessant ist es den Effekt von situationalen Interessen auf die schulische Leistung zu untersuchen, denn diese Interessen kann der Lehrer durch seine didaktischen Maßnahmen wesentlich beeinflussen. Der erwartete positive Effekt auf die Lernleistung liegt der Annahme zugrunde, dass durch eine interessante Unterrichtsgestaltung der Lernerfolg größer sein sollte. Das klingt plausibel, ist aber empirisch noch nicht hinreichend bewiesen, obwohl vereinzelt schon positive Interesseneffekte nachgewiesen werden konnten.

## **2.5 Interesse der Schüler an Physik**

Jeder Schüler hat nur wenige, ganz bestimmte Interessen. Deshalb können diese persönlichen Interessen nur punktuell zu größerer Lernbereitschaft führen. Überhaupt zeigte sich aus zahlreichen Forschungsergebnissen zum Verhältnis Schule und Interesse, dass die Themen in der Schule eher wenig interessieren, ja sogar, dass das Interesse während der Schulzeit weiter sinkt [Hoffmann & Lerke (1986); Häußler & Hoffmann (1995)].

Eine der aktuellsten Studien über das im Laufe der Schulzeit sinkende Interesse an Physik wurde von Rost et al. (1999) durchgeführt. Dabei wurden Daten einer bereits 1984-89 durchgeführten Umfrage mit insgesamt über 6000 Schülern der 6.-10.Klassenstufe verwendet und einer neuen Analysenmethode (Mixed Rasch Modell) unterzogen, die es erlaubt, Interesse sowohl quantitativ als auch qualitativ hinsichtlich der Interessenstruktur zu erfassen. Das Interesse wurde hinsichtlich der Faktoren Tätigkeit, Kontext und Gebiet differenziert und die Schüler unter der Annahme, dass sie sich individuell bezüglich dieser Faktoren unterscheiden, in Interessentypen zusammengefasst. Im wesentlichen kristallisierten sich drei Typen heraus:

- Ein Typ, der sich vor allem für die Anwendungen der Physik im Dienste der Menschen bzw. für die Bedeutung der Physik in der Gesellschaft interessierte.
- Ein zweiter Typ, der sich für die Physik als Wissenschaft interessierte.
- Ein dritter Typ, der ein „nicht geordnetes Antwortverhalten“ zeigte.

Die Untersuchung, wie die Interessentypen von Alter und Geschlecht abhängen hat ergeben, dass bei den Mädchen im Laufe der Schuljahre ein starker Zuwachs zum „gesellschaftlichen Typ“ stattfindet (von 35% bis auf 60%), also die Mädchen sich mit zunehmenden Alter immer mehr für Anwendungen der Physik bzw. für die gesellschaftliche Bedeutung der Physik interessieren, während bei den Jungen die Zugehörigkeit und die Zunahme zu diesem Typ eher gering ausfällt (von 10% bis auf 20%). Hingegen sind Jungen zu einem höheren Prozentsatz der „Physik als Wissenschaft“ zugetan und dieses Interesse nimmt auch über die Schuljahre hinweg weniger stark ab als bei den Mädchen.

Zu einer ähnlichen Ansicht kamen auch Häußler et al. (1996). Sie überlegten sich, durch welche Maßnahmen man den Physikunterricht insbesondere für die Mädchen interessanter gestalten könnte. Dies waren ein zeitweise getrennt geschlechtlicher Physikunterricht, um das Selbstvertrauen der Mädchen zu steigern, eine Sensibilisierung der Lehrkräfte, ein mädchengerechtes Lernklima zu schaffen und eine Unterrichtsgestaltung, die sich an den Interessen der Schülerinnen orientiert. Schülerinnen zeigten vor allem dann Interesse an einem physikalischen Inhalt, wenn dieser mit einem bestimmten Kontext verknüpft war, insbesondere The-

men mit einem Bezug zum menschlichen Körper, zu Naturphänomenen oder zu gesellschaftlich relevanten Fragen. Die Autoren betrachten drei Gruppen von Interessententypen:

- Typ A: Interesse an Physik als Wissenschaft, an Technik und an technischen Berufen, am Umgang mit und am Bauen von Geräten
- Typ B: Interesse an einer Physik, die Erscheinungen in der Natur erklärt und die dem Menschen dient
- Typ C: Interesse an der Bedeutung der Physik für die Gesellschaft

	Typ A	Typ B	Typ C
Insgesamt	20,0	55,0	25,0
davon:			
Jungen	80,2	49,6	28,5
Mädchen	19,8	50,4	71,5

Es wurde folgende, in der Tabelle dargestellte, prozentuale Verteilung gefunden: Man erkennt, dass der Typ B nicht nur zahlreich vertreten ist (55,0 % von Lernenden), sondern auch gleichmäßig verteilt ist (49,6 % Jungen und 50,4 % Mädchen). Die für Mädchen interessanten

Themen fanden auch die Jungen interessant, so dass sich der Unterricht an den Mädchen orientieren kann, ohne dabei nachteilig für die Jungen zu sein. Diese Untersuchung zeigt auch, dass mit dem Alter (von 12 bis 16) die Schülerzahl von Typ A sinkt, während diejenige von Typ C steigt.

Das hohe Interesse der Schülerinnen und Schüler an Themen, die den Alltag oder die Biologie betreffen, wurde schon früh festgestellt. Todt führte Anfang der 70er Jahre eine Befragung von fast 10000 Schülern und Schülerinnen der 5. bis 9. Jahrgangsstufe durch. Er fand, dass eine „Verpackung“ der Themen in direktem Bezug zur Technik für Jungen und Mädchen sehr unterschiedlich interessant ist, während in Bezug zum Alltag die Geschlechtsdifferenz der Interessen minimal ist [Todt (1991); Todt & Händel (1988)]. Auch bei Todt (1978) zeigte sich ein hohes Interesse von 10-16-jährigen Schülern an Gesundheitsinformation und Biologie im allgemeinen. Dieses prinzipielle Interesse machte sich auch Berger zunutze und stellte einen medizinisch orientierten Physikunterricht vor, in dem er die physikalischen Phänomene Röntgenstrahlung und Wellen anhand einiger der wichtigsten physikalischen Diagnosegeräte, des Ultraschallgeräts und der Computertomographie, erklärte [Berger (2000)]. Dabei konnte Berger zeigen, dass ein derart kontext-orientierter Unterricht bei gleichem fachlichen Anspruchsniveau einem eher traditionellen Unterricht hinsichtlich der Interessantheit wesentlich überlegen ist. Insbesondere werden diejenigen Schülerinnen besonders gefördert, deren allgemeines Physikinteresse unterdurchschnittlich ist, sodass sich die Schere zu den anderen Gruppen weitgehend schließt. Insgesamt stimmen die Ergebnisse, die Berger in der Oberstufe gewonnen hat, mit den bekannten Befunden des IPN [Hoffmann et. al. (1997)] in der Mittelstufe überein.

Ähnliche positive Einflüsse durch eine Einbeziehung medizinischer Inhalte fand auch Müller bei Wahlkursen in der Gymnasialen Oberstufe [Müller (1997)]. In einer weiteren Untersuchung in der 11. Jahrgangsstufe (1996-98) konnte nach Kursabschluss eines medizinisch orientierten Physikunterrichts festgestellt werden, dass die Beliebtheit des Faches Physik von 19 % der Schüler und 16 % der Schülerinnen auf 47 % der Schüler und 40 % der Schülerinnen gestiegen ist. Dabei belegen die Untersuchungsergebnisse, dass über 75 % der Schülerinnen und Schüler das Gefühl hatten, für sich selbst oft bzw. sehr oft etwas dazu gelernt zu haben. Von den restlichen 25 % gab niemand an, selten oder nichts dazu gelernt zu haben.

### 3 Medizinischer Kontext

Die Medizin hat sich von der rein empirischen Disziplin zu einer echten Wissenschaft entwickelt und das gilt im Grunde für alle Zweige der Medizin. Sogar die Pathologie versucht heute Krankheiten zu erklären, indem sie genau nach ihren Ursachen und Entstehungsmechanismen forscht. Bei der Diagnosefindung werden Bildaufnahmen und quantitative Auswertungen immer häufiger eingesetzt, auch wenn die diagnostische Tätigkeit ein hohes Maß an Erfahrung verlangt.

Heute ist klar, dass im lebenden Körper die gleichen physikalischen und chemischen Gesetze gelten wie für die nicht belebte Materie. Die Physiologen betrachten den Körper der Lebewesen als Mechanismus, der trotz seines komplexen Aufbaues, von seinen Einzelteilen und deren Tätigkeiten verstanden werden kann.

#### 3.1 Zur Auswahl des medizinischen Kontextes

Aus der Interessenforschung ist zu erkennen, dass eine wichtige Bedingung für eine *intrinsische Lernmotivation* eine für die Schüler inhaltliche Relevanz des Lernstoffes ist.

Wie kann man also den Schülern naturwissenschaftliche Fächer, allen voran die Physik, wieder schmackhaft machen? Eine mögliche Antwort lautet, dass man auf die Interessen der Schüler und Schülerinnen eingehen soll. Es soll eine *intrinsische Lernmotivation*, insbesondere in den höheren Klassenstufen gefördert werden, weil Untersuchungen dort eine größere Korrelation zwischen Interesse und Leistung ergeben haben [Krapp & Prenzel (1992)].

Die empirischen Befunde ergeben, dass die Interessenunterschiede zwischen den verschiedenen Gebieten der Physik gering sind. Entscheidender für die Ausprägung des Sachinteresses ist es, mit welchem Kontext und mit welchen Tätigkeiten ein physikalischer Inhalt verknüpft ist [Häußler (1987)].

Bild 3.1.1 bietet eine eindrucksvolle Übersicht über Schülerinteressen in verschiedenen Kontexten.

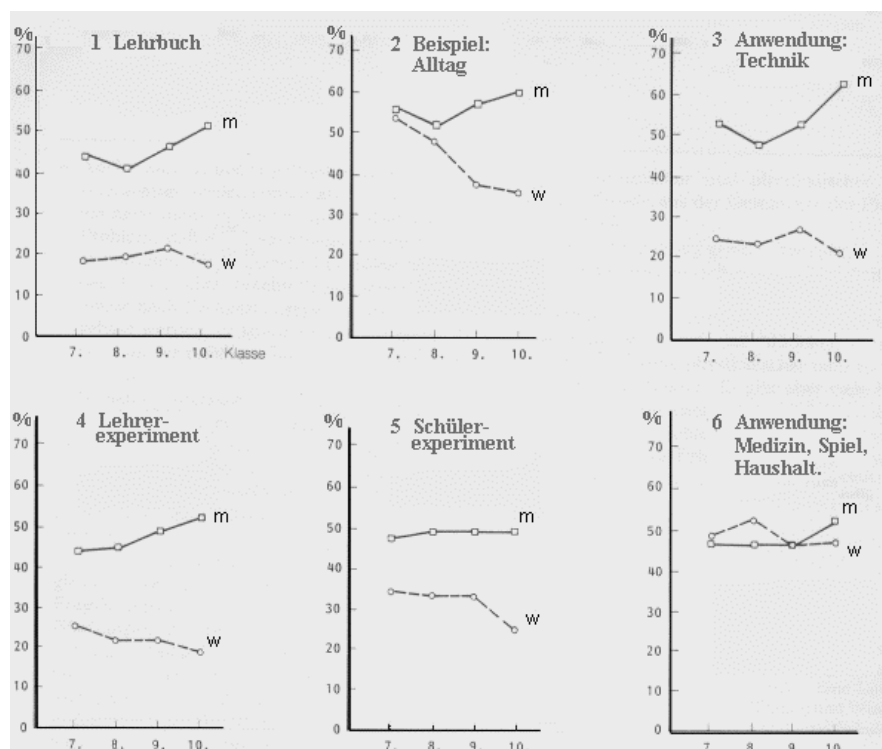


Bild 3.1.1: Prozentsatz der Schülerinteressen für verschiedene Kontexte gemittelt [aus Todt & Händel (1998)]

An dieser umfangreichen Untersuchung waren 1100 Schüler und Schülerinnen beteiligt und es wurde das Interesse an verschiedenen Themenkontexten von der Klassenstufe 7 bis 10 untersucht [Todt & Händel (1988)].

Die Anwendung physikalischer Inhalte auf Themen aus den Bereichen Medizin, Haushalt, Spiel, und zum Teil, dem Alltag wurde sowohl von den Jungen als auch von den Mädchen gleichermaßen hoch bewertet. Alle anderen vier Punkte wurden von den Mädchen deutlich niedriger bewertet als von den Jungen. Wie zuvor bereits erwähnt, zeigen Schüler und Schülerinnen mehr Interesse am Unterricht, wenn Themen behandelt werden, die einen gewissen Lebensbezug beinhalten und die Schüler erkennen, dass sie dieses Wissen auch nützen können. Da Interessen nicht statisch und meistens mit einer emotionalen Komponente verbunden sind, scheinen gerade medizinische Themen – die ja das eigene Leben betreffen und daher Emotionen hervorrufen – positive Anreize und Gefühle zu schaffen, die das Interesse an einem Unterricht mit medizinischem Kontext nähren. Tatsächlich hat sich die Medizin, allerdings in wenigen durchgeführten Untersuchungen, als ein sehr beliebtes Gebiet mit einer geringen Geschlechtsdifferenz erwiesen.

Die größere Aufmerksamkeit durch einen mit medizinischen Themen gestalteten Unterricht beruht hauptsächlich auf der Einsicht, dass Wissen über die Gesundheit nützlich ist oder zumindest sein kann. Das heißt, auch wenn die Schüler nicht unbedingt sofort einen praktischen Nutzen sehen, so schadet dieses Wissen für die Zukunft nicht, und die Schüler wissen das. Im Allgemeinen ist die Gesundheit heutzutage mehr in das Bewusstsein der Menschen gerückt und es ist vor allem für die jüngere Generation nicht nur wichtig gesund zu sein, sondern sich auch körperlich wohl zu fühlen und gut auszusehen.

Da die Medizin einen großen Einfluss auf das Interesse haben kann, sollten öfter medizinische Themen im Unterricht behandelt werden. Dabei spielt schon der Titel einer Einheit eine wichtige Rolle. Er kann eine interessierte oder ablehnende Haltung der Schüler erzeugen. Einer Einheit mit einem medizinischen (oder überraschenden) Titel wird, zumindest am Anfang des Unterrichts, aufmerksamer gefolgt als der gleichen Einheit, dessen Titel einen traditionellen Inhalt ankündigt. Deswegen ist das betreffende medizinische Thema im Titel zu nennen, ohne Schüler oder Lehrer irrezuführen, denn sowohl die Medizin als auch die damit verknüpfte Physik ist Inhalt der Einheit.

Die gewählten Titel sollen besser Worte enthalten, die eine direkte Nützlichkeit voraussagen: Z. B. „Belastung der Wirbelsäule bei falschen Haltungen“ statt „Belastung der Wirbelsäule“.

### **3.2 Bedingungen zur Förderung der Interessen**

Es sind aber nicht nur die Themen allein ausschlaggebend für das Interesse, sondern sehr wohl auch die allgemeinen Bedingungen im Unterricht [Todt (1993)]. Etwa, ob der Lehrer gerecht beurteilt, ob er fähig ist, den Stoff gut zu erklären, ob er erkennt, wenn die Schüler etwas nicht verstanden haben, oder ob der Unterricht abwechslungsreich ist. Sind diese Bedingungen nicht gegeben, so kann ein genau gegenteiliger, kontraproduktiver Effekt eintreten und prinzipiell vorhandenes Interesse beeinträchtigen. Eine Überforderung der Schülerinnen und Schüler, eine geringe Wertschätzung oder ungerechte Beurteilung durch die Lehrerinnen und Lehrer sind typische Beispiele, den Schülern die eventuell vorher vorhandene Freude oder Begeisterung am Lerngegenstand zu nehmen.

Die Gestaltung des Unterrichts ist für die Interessantheit sehr wichtig, in so fern als dass die Gestaltung Staunen, Neugierde, Lust auf das Kennenlernen und auf das Tun fördern kann. Eine detaillierte Auswertung der Interessenstudie von Mädchen und Jungen auf der Grundlage einer pädagogisch wünschenswerten physikalischen Bildung in unserer heutigen Gesellschaft [Delphy-Studie, Häußler et al. (1998)] führte zu einer Liste von zehn vorgeschlagenen Merkmalen, die zur Gestaltung eines interessanten Unterrichts zu berücksichtigen sind (Tab. 3.2.2).

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Man sollte den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit gegeben, zu staunen und neugierig zu werden, und daraus sollten sie ein Aha-Erlebnis haben.</li> <li>2. Man sollte an außerschulischen Erfahrungen anknüpfen, die zur Vermeidung geschlechtsspezifischer Dominanzen Mädchen und Jungen in gleicher Weise zugänglich sind.</li> <li>3. Es sollte den Schülerinnen und Schülern ermöglicht werden, aktiv und eigenständig zu lernen und Erfahrungen aus erster Hand zu machen.</li> <li>4. Die Schülerinnen und Schüler sollten einen Bezug zum Alltag und zu ihrer Lebenswelt herstellen können.</li> <li>5. Es sollte dazu angeregt werden, dass die Schülerinnen und Schüler die Bedeutung der Physik in der Gesellschaft erkennen und auch danach handeln.</li> <li>6. Es sollte der lebenspraktische Nutzen der Physik erfahrbar werden.</li> <li>7. Es sollte ein Bezug zum eigenen Körper hergestellt werden.</li> <li>8. Es sollte die Notwendigkeit und der Nutzen der Einführung und des Umgehens mit quantitativen Größen verdeutlicht werden.</li> <li>9. Es sollte sichergestellt werden, dass den Formeln ein qualitatives Verständnis der Begriffe und ihrer Zusammenhänge vorausgeht.</li> <li>10. Es sollte eine vorzeitige Abstraktion vermieden werden zugunsten eines spielerischen Umgangs und unmittelbaren Erlebens.</li> </ol> |
|---|

Tab. 3.2.2: Zehn interessefördernden Merkmale für die Gestaltung eines interessanten Physikunterrichts  
[nach Häußler & Hoffman (1995)]

Es ist leicht zu erkennen, dass für medizinische Themen diese zehn Merkmale in direkter Weise gegeben sind, ohne Gedankensprünge zu machen. Im folgenden werden bezüglich dieser Merkmale einige Überlegungen angeführt, die uns bei der Einbettung von medizinischen Themen in unsere Einheiten geleitet haben.

- Schüler und Schülerinnen im medizinisch orientierten Physikunterricht lernen den menschlichen Körper kennen und bestaunen ein Wunder der Natur. Die vielen aufeinander abgestimmten Funktionen der einzelnen Körperteile und Organe werfen sicherlich immer neue Fragen auf, die beantwortet werden wollen und mit einem Aha-Erlebnis befriedigt werden wollen (Merkmale 1; 4; 7).
- Schüler und Schülerinnen haben, in gleicher Weise, sicherlich schon selbst außerschulische Erfahrungen mit medizinischen Problemen gemacht, sei es bei einem Arzt- oder Krankenhausbesuch oder sei es durch Diskussionen innerhalb der Familie. Daher ist bei einem Physikunterricht mit medizinischem Kontext auch eine größere Mitarbeit der Schüler und Schülerinnen zu erwarten (Merkmale 2; 4).
- Viele Abläufe im Körper können besser erklärt und beschrieben werden, indem man sie durch einfache Modelle bzw. Simulationen veranschaulicht. Dabei können die Schüler durch teilweise freies Experimentieren aktiv und eigenständig sein (Merkmale 3; 10).
- Durch das bessere Verstehen der Organfunktionen im menschlichen Körper können Krankheiten besser erkannt und im besten Fall verhindert werden, sie können auch durch die modernen physikalischen Geräte besser diagnostiziert und geheilt werden. Das Wissen um die Abläufe im Körper ist aber auch zum Beispiel im Hochleistungssport von großer Bedeutung (Merkmale 5; 6).
- Die meisten medizinischen Geräte und viele therapeutische Verfahren wurden von physikalischen Gesetzen ausgehend entwickelt (Merkmal 6).
- In der Medizin ist die Quantität einer Größe (Konzentration, Druck, Energie usw.) entscheidend für die jeweilige Wirkung im menschlichen Körper. Die Notwendigkeit des Umgehens mit quantitativen Größen kann daher in der medizinischen Physik eindrucksvoll dargestellt werden (Merkmal 8).

- In einem medizinisch-orientierten Physikunterricht werden zunächst die auftretenden Phänomene besprochen und qualitativ erklärt. Dann können sie besser in abstrakte Formeln gefasst werden (Merkmal 9).

Weitere Überlegungen:

- Medizinische Themen bieten sich hervorragend als Leitmotiv für den Unterricht an. Der perfekt funktionierende Körper lässt die Schüler staunen und weckt so ihre Aufmerksamkeit. Auch das Wissen um Dinge, die im Körper schief gehen können und Krankheiten auslösen, wird im allgemein als interessant angesehen.
- Medizinische Themen ermöglichen eine „Verpackung“ des Physikunterrichts, wobei physikalisches Wissen nicht nur Erklärungen, sondern auch Lösungen von Problemen geben kann, so dass eine Gesundheitserziehung gewährleistet werden kann.

Die von dem Lehrer gegebene Dosierung des medizinischen Anteils ist wichtig: Zuviel Medizin überfordert und führt mit zu weiten Abschweifungen vom Lehrstoff zu einem unübersichtlichen Unterricht, während zu wenig Medizin zu einem trockenen Unterricht führen kann, ohne die erwarteten Vorteile des Bezuges Physik-Medizin mitzubringen.

### **3.3 Zweckmäßigkeit von medizinischen Kontexten**

Die Möglichkeit durch geschickte „Verpackung“ das Interesse der Schülerinnen und der Schüler im Physikunterricht wecken zu können, ist allein nicht hinreichende Bedingung für die Inhaltsauswahl. Der Inhalt soll auf einem Niveau gestaltet und unterrichtet werden können, das der Leistungsfähigkeit der Schüler entspricht, sodass ein sachgemäßes Verständnis bei den Schülerinnen und Schülern erreicht werden kann. Dieser erforderliche „Abbau der Komplexität“ (Elementarisierung) ist bei Erklärungen von biologischen Abläufen ein Problem, weil die biologischen Prozesse sehr komplex sind. Auch eine Erklärung eines elementaren Prozesses kann sehr schwierig sein, wenn dafür das Einbringen verschiedener anderer Disziplinen (aus der Physik oder Chemie) zu berücksichtigen ist. Die Betrachtung nur der wichtigsten Aspekte eines biologischen Ablaufs kann mit Erfolg erreicht werden, indem sie durch Modelle simuliert sind. Wenn die Modelle auf die Grundfunktionen reduziert werden, können die auftretenden Effekte klar von den Schülerinnen und Schülern erkannt werden, ohne dass Vorkenntnisse benötigt werden, die bei den Schülerinnen und Schülern bei einer ausführlichen Betrachtung des Themas vorhanden sein sollten. Dabei kann, auch wenn begrenzt, die Erklärung des Themas in sich logisch geschlossen sein. Je größer allerdings die Vereinfachung ist, desto weiter hat man sich vom lebenden Organismus entfernt und desto vorsichtiger muss man sein.

Beim Einbetten von medizinischen Themen in den Physikunterricht soll die Beziehung zwischen dem Physik- und dem Biologieunterricht in Bezug auf den Menschen betrachtet werden, weil beide sich mit denselben Fragen beschäftigen können, und die Durchführungsmethoden beider Fächer heute nicht sehr unterschiedlich sind. Da aber Organismen stets Resultate einer Anpassung aufgrund einer genetischen Evolution mit einer Zweckmäßigkeit sind, wird der Ablauf der biologischen Funktionen im Biologieunterricht meistens dadurch erklärt, dass man auf die Frage „wozu“ diese Funktionen dienen antwortet. Auf diese Frage kann meist eine leicht verständliche Antwort gegeben werden, ohne spezifische Zuhilfenahme von anderen Disziplinen (z. B. Physik). Damit beide Disziplinen sich ergänzen können, soll dann im Physikunterricht vor allem die Frage nach dem „Wie“ geklärt werden, auch wenn diese die Schwierigkeit mit sich bringt, eine große gegenseitige Abhängigkeit zwischen den vielen Bestandteilen eines komplexen Systems betrachten zu müssen.

## 4 Vorgeschlagene Themen<sup>1</sup>

Die vorgeschlagenen Themen sind als Unterrichtseinheiten gedacht und unterrichtsbezogen aufbereitet. Die Einheiten sind Medizin-orientiert konzipiert, d.h. es wird von medizinischen bzw. biologischen Abläufen ausgegangen und nach den zugrunde liegenden physikalischen Gesetzen und Sachverhalten gefragt. Es besteht auch die Möglichkeit, physikalische Gesetze und Sachverhalte in den Vordergrund zu stellen und den Bezug zur Medizin als Anwendung herzustellen. In den Einheiten werden sehr einfache mathematische oder qualitative Formulierungen der Aussagen verwendet. So weit wie möglich sind Experimente vorgesehen.

Aus Zeitgründen sind die Einheiten sicherlich nicht vollständig realisierbar. Sie sind als Sammlung von Ideen anzusehen, aus der die Lehrkräfte im Sinne eines Baukastens selbstständig in ihr Konzept passende Teile zusammenstellen und an die Situation in der jeweils unterrichteten Klasse anpassen können.

Für jede Einheit gilt:

- Grundziel ist es, die Aufmerksamkeit der Schüler zu gewinnen, um wissenschaftliche Methoden und physikalische Größen und Gesetze, die zum Kapitel gehören, im Rahmen eines attraktiven und erfolgreichen Unterrichts behandeln zu können. Nebenziel ist es, Struktur und Funktion von wichtigen Systemen, medizinischen Abläufen, Untersuchungen und Therapien am Körper kennen zu lernen.
- Die physikalischen Begriffe, die den Lehrerinnen und Lehrern vertraut sind, werden nur kurz erwähnt. Die Beschreibung des medizinischen Hintergrundes erfolgt qualitativ, ohne sich zu sehr in Details zu verlieren. Dadurch werden Verständnisschwierigkeiten aufgrund komplexer medizinischer Zusammenhänge vermieden. Der medizinische Teil ist dennoch ausführlich beschrieben, um das nötige Hintergrundwissen bereitzustellen. Somit können Lehrerinnen und Lehrer sich auf diesem Gebiet sicher fühlen, um fachliche Autorität ausstrahlen und die Themen entsprechend vorzustellen.
- Die vorgeschlagenen Versuche sind sehr anschaulich und haben direkten Bezug zu wichtigen physiologischen Abläufen. Alle Versuche können mit einfachen Mitteln realisiert werden. Die Schülerinnen und Schüler können daher aktive Teilnehmer sein, indem sie die Versuche selbst aufbauen und durchführen. Die entwickelten Modelle wurden auf die Grundfunktionen reduziert, damit die auftretenden Effekte für Schülerinnen und Schüler klar erkennbar sind. Die Schülerinnen und Schüler sollen auf die Unzulänglichkeit der Modelle im Vergleich zur Wirklichkeit hingewiesen werden. Sie sollen erfahren, dass die Modelle zur Gewinnung von Kenntnissen benutzt werden, aber ein Modell nur einige wesentliche Merkmale der Wirklichkeit abbilden kann. Mit anderen Worten: es werden wenig wichtige Einzelabläufe weggelassen, die Kernaussage bleibt unberührt.
- Die behandelten Themen sind nicht nur fachüberschreitend, sondern bieten sich auch für einen fächerübergreifenden Unterricht an. Voraussetzung dafür ist, dass Lehrkräfte mehrerer Fächer bei der Planung und unterrichtlichen Umsetzung kooperieren, um gemeinsam zur Erarbeitung des Themas beizutragen.

---

<sup>1</sup> Einige Themen werden, durch Einbeziehung weiterer didaktischer Gesichtspunkte, unter [www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/) abrufbar sein.



## 4.1 Drehmomentgleichgewicht bei Lebewesen<sup>1</sup>

### Vorbemerkungen

Zur Erklärung bzw. Veranschaulichung des Gleichgewichts bei Kräften und Drehmomenten werden im Physikunterricht üblicherweise viele einfache und darunter auch alltagsnahe Beispiele aus der Technik benutzt. An Beispielen dieser Art sind die Schüler, vor allem aber die Schülerinnen, nicht übermäßig interessiert. Es wird deshalb als didaktische Alternative vorgeschlagen, im Unterricht die Bedingungen für Gleichgewichte beim menschlichen Arm, bei der Wirbelsäule und bei Kauapparaten von Tieren und Menschen in den Vordergrund zu stellen.

Die Beschreibung des Gleichgewichts am Arm liefert die gleichen Konzepte wie beim Unterkiefer, allerdings ohne die zusätzliche Schwierigkeit, einen Kauwiderstand als Reaktionskraft berücksichtigen zu müssen. Außerdem kann man hier ein- bzw. zweiseitige Hebel betrachten. Die Behandlung des Gleichgewichts am menschlichen Arm hat daher die Funktion, die Begriffe Hebel, Drehmoment und Schwerpunkt einzuführen. Dass bei diesen Beispielen mit dem einseitigen Hebel begonnen wird, ist etwas ungewöhnlich, hat aber möglicherweise auch didaktische Vorteile. Denn die gegenläufigen Drehwirkungen sind hier offensichtlicher als beim Standardbeispiel, der Wippe.

Man kann verschiedene Kauapparate heranziehen und zwar Kauapparate einerseits von furchterregenden Tieren wie von Krokodilen und Dinosauriern, andererseits von beliebten Haustieren (z. B. Hunden) oder von Menschen. Der Vergleich von Kräfte- und Drehmomentgleichgewicht bei Unterkiefern von ursprünglichen, primitiven mit heutigen Tieren ist dabei besonders interessant. Anhand von platten Unterkiefern und solchen mit höckerförmigen Fortsätzen werden die Begriffe Hebel, Drehmoment und Schwerpunkt vertieft und gefestigt.

Das Gleichgewicht bzw. die Belastung der Wirbelsäule wird als Anwendung für die Schüler genutzt. Anhand der Erklärung der Belastbarkeit der Wirbelsäule werden die Schülerinnen und Schüler den Nutzen der physikalischen Konzepte Kraft, Hebelarm, Drehmoment und Schwerpunkt und des Hebelgesetzes nochmals erkennen. Sie können deshalb gesündere Haltungen und Bewegungen aus physikalisch-anatomischer Sicht besser verstehen und vielleicht für sich selbst berücksichtigen.

Die Schülerinnen und Schüler lernen im Verlauf der Unterrichtseinheit

- die physikalischen Größen Hebel, Drehmoment und Schwerpunkt kennen und die Gesetze anzuwenden;
- die notwendigen Bedingungen zur Herstellung eines Kräfte- und Drehmomentgleichgewichts zu erkennen;
- Kräfte und Drehmomente zu messen;
- die starke Verbindung zwischen ökologischer Anpassungsmöglichkeit und physikalischen Gesetzen zu erkennen;
- Knochen, Gelenke, Muskeln und ihre Funktionen kennen.

### Biologisches und physikalisches Basiswissen

#### Knochen

Der Knochen besteht zu 2/3 aus Kalksalzen und 1/3 aus organischen Bestandteilen, vor allem aus einer eiweißreichen Grundsubstanz, aus kollagenen Fasern und Zellen.

Die meisten Knochen sind aus einer kompakten, harten Knochenschale und einer schwammartigen Innenzone aufgebaut. In den inneren Hohlräumen mancher Knochen befindet sich das

---

<sup>1</sup> Teile der Einheiten wurden bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (2000a; 2000b und 2000e)].

Knochenmark. An den Enden der langen Knochen (Röhrenknochen) dominiert die schwammartige Innenzone, in der Mitte die feste Außenschicht.

Die Gestalt der einzelnen Skelettknochen wird weitgehend von deren Funktion geprägt. Bei den Gliedmaßenknochen herrscht eine röhrenförmige Gestalt vor, während die die Körperhöhlen umschließenden bzw. schützenden Knochen eine mehr flächenhafte Gestalt besitzen.

Alle Knochen werden von einer Knochenhaut überzogen, die durch ein Netz von Nerven und Blutgefäßen für den Stoffwechsel verantwortlich ist.

Der Knochen ist kein totes Gewebe, sondern befindet sich in ständigem Auf- und Abbau. Es handelt sich um ein veränderliches, äußerst anpassungsfähiges Gewebe, das von Zellen durchsetzt und belebt wird. Das Wachstum der Knochen folgt im allgemeinen genetischen und funktionellen Bedingungen. Ändern sich die funktionellen Bedingungen, so kann sich der Knochen rasch diesen Veränderungen anpassen. Nimmt zum Beispiel die auf ein Knochenelement einwirkende Kraft zu, erhöht sich die Spannung im Knochengewebe. Diese Spannungsänderung wirkt als Reiz, der einen verstärkten Knochenbau auslöst. Sinken die Belastungen (z. B. bei langer Bettlägerigkeit), wird Knochensubstanz abgebaut. Im Alter nimmt die Anpassungsfähigkeit der Knochen ab, der Abbau überwiegt dem Aufbau. Es erhöht sich der Mineralgehalt, die Knochen werden daher spröder und weniger elastisch, weshalb Brüche im Alter häufiger vorkommen als in der Jugend.

Die Festigkeit des Knochens ergibt sich aus seiner inneren Struktur. Bei der Geburt besteht der Knochen noch vorwiegend aus Knorpelsubstanz, die nach und nach verknöchert wird. Ausgelöst durch die Belastungen bei der Fortbewegung, wird die primitive Strukturform des Geflechtknochens in die komplizierte und feste Form des Lamellenknochens umgewandelt.

Das Schwammgewebe (Spongiosa) bildet ein Geflecht feinsten Knochenbälkchen, die ziemlich genau in den Hauptspannungslinien (Trajektorien) liegen, die bei den Druck- und Zugbelastungen auftreten. Damit wird mit einem Minimum an Material ein Maximum an Festigkeit erzielt. Die Knochen besitzen eine hohe Elastizität (wie Eichenholz) und eine hohe Zugfestigkeit (wie Kupfer), die Druckfestigkeit ist wegen der eingelagerten Mineralien größer als Sandstein, sie liegt in der Größenordnung von  $10^{11}$  Pa.

Die Knochenelemente sind untereinander durch Gelenke verbunden, die die Bewegungen der verschiedenen Skeletteile ermöglichen.

Im Gelenk existiert ein Gelenkraum, der mit einer Gelenkflüssigkeit gefüllt ist. Sie hat neben der Funktion der Stoßdämpfung und Schmierung auch die Funktion den gefäß- und nervenfreien Gelenkknorpel zu ernähren.

Gelenke, Knochen und Muskeln bilden ein System von Hebeln, das die Skelettbewegungen ermöglicht. Im Gleichgewichtszustand können im Gelenkbereich nur Druckkräfte auftreten. Drehmomente würden eine Drehung in einen neuen Gleichgewichtszustand bewirken.

## **Muskeln**

Man unterscheidet drei Formen des Muskelgewebes:

- Die glatte Muskulatur: Das ist die langsam arbeitende unwillkürliche Muskulatur, die z.B. die Peristaltik des Darms bewirkt.
- Die rhythmisch sich kontrahierende Herzmuskulatur und
- die willkürlich regulierbare quergestreifte Muskulatur: Diese bildet den größten Teil der Körpermuskulatur, die bewusst durch das Gehirn gesteuert wird. Diese Muskeln greifen an zwei verschiedenen Knochen an, so dass der entsprechende Muskel über ein Gelenk zieht. Einige Muskeln greifen direkt am Knochen an, andere über Sehnen, so dass der Muskelbauch weit entfernt vom Ansatzpunkt liegt. Dies ermöglicht eine Fokussierung der Zugrichtung auf ein kleines Areal und eine Änderung der Richtung der Muskelaktion. Diese Muskeln sind in der Regel so gebaut und positioniert, dass sie aus biomechanischer Sicht einen deutlichen Vorteil für ihre Hauptaufgabe haben. Sie lassen sich generell durch ihre Hauptfunktion einteilen:

- Die Agonisten bewirken die gewünschte Bewegung;
- Die Antagonisten wirken dem Agonisten bei einer bestimmten Bewegung entgegen;
- Haltemuskeln und Haltungsmuskeln halten bestimmte Körperteile in der richtigen Position;
- die Synergisten schützen vor unerwünschten Bewegungen.

Die Skelettelemente werden durch zahlreiche Einzelmuskeln bewegt, wobei die Muskelkontraktion zu Stellungsänderungen im Gelenk führt. Hierbei spielen die Hebelverhältnisse und Drehmomente eine wichtige Rolle.

Normalerweise kann sich ein Muskel bis zur Hälfte seiner Länge verkürzen, deshalb besitzen Muskeln mit langen Fasern einen größeren Bewegungsspielraum als solche mit kurzen. Lange und schlanke Muskelbäuche kommen also meist dort vor, wo der Bewegungsumfang der Gelenke groß ist. An Stellen, an denen viel Kraft benötigt wird, erscheinen die Muskeln hingegen kurzfasrig und plump.

Die Muskeln können auch als Zuggurte der langen Röhrenknochen dienen, um die Biegespannungen zu reduzieren bzw. die Spannung besser zu verteilen. Dadurch wird Knochenmaterial gespart.

Der quergestreifte Muskel setzt sich aus Faserbündeln zusammen. Ein großer Muskel (z.B. Gesäßmuskel) kann aus Tausenden solcher Faserbündel bestehen. Die Muskelfasern wiederum besitzen kontraktile Elemente (Myofibrillen), deren Grundbausteine die Mikrofilamente (zwei Proteine) bilden, die für die Muskelkontraktionen verantwortlich sind: Gesteuert werden die Kontraktionen durch Impulse vom Gehirn. Die Nervenimpulse reizen den Muskel dadurch, dass sie einen chemischen Stoff (Acetylcholin, ein Neurotransmitter) freisetzen, der eine Kette von chemischen und elektrischen Prozessen auslöst, die eine Art teleskopartiges Zusammenschieben der Mikrofilamente bewirken und somit eine Verkürzung (Kontraktion) des Muskels.

## 4.1.1 Statik des menschlichen Armes

Die Bewegungsapparate besitzen üblicherweise eine hochentwickelte Organisation. Bei Apparaten, die verschiedene Aufgaben zu erfüllen haben, liegt im Prinzip eher eine Kombination von unabhängigen Einzelmuskeln vor, während bei anderen Apparaten eine mehr automatische Gruppentätigkeit der Muskeln vorherrschen kann. Die Muskeln von Arm, Hand und Finger müssen z. B. unter der Kontrolle des Sehorgans fähig sein, voneinander unabhängige Bewegungen auszuführen. Dabei müssen die Muskeln sowohl erhebliche Kräfte entfalten als auch feine Bewegungsspiele durchführen können. Um diese Funktionen gewährleisten zu können, müssen Muskeln, Knochen und Gelenke aufeinander abgestimmt sein, wobei bestimmte Konstruktionsprinzipien eingehalten werden. Trotz der stärkeren Gebundenheit an diese Konstruktionsprinzipien hatte die Entwicklung im Laufe der Evolution, natürlich unter einschränkenden Bedingungen, auch eine gewisse Freiheit aus Aufbaumöglichkeiten auswählen zu können, die vom Körper ausgenutzt wurde. Andere Muskel- und Knochenanordnungen am Arm, die gleiche Bewegungen mit dem notwendigen Kraftaufwand verrichten können, sind daher denkbar. Bessere Anordnungen als die von der Natur geschaffenen, sind wahrscheinlich auch für Fachleute nicht einfach zu finden.

Anhand der Unterrichtseinheit werden die Begriffe Drehmoment und Schwerpunkt eingeführt und die Gesetze für das statische Gleichgewicht (Hebelgesetze) formuliert. Die Schüler werden dabei auch die Perfektion, Nützlichkeit und Ökonomie der Konstruktion des Armes verstehen können.

### A. Basiswissen über das Gleichgewicht am menschlichen Arm

#### Anatomie des Armes

Die Architektur des Muskel- bzw. Knochensystems von Ober- und Unterarm ist – bereits sehr vereinfacht – in Bild 4.1.1.1 gegeben. Vorne am Oberarm sind zwei Beugemuskeln mit unterschiedlich langen Hebelarmen zum Heben der Last ausgebildet, die verschieden weit entfernt vom Ellbogengelenk ansetzen.

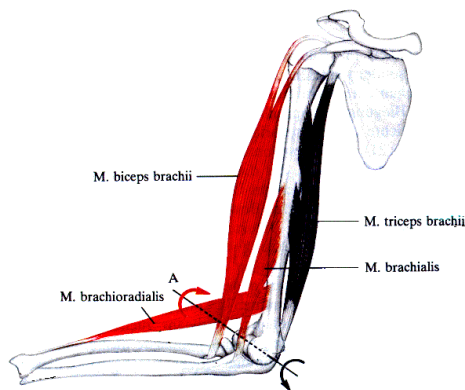


Bild 4.1.1.1: Darstellung der am Arm wirkenden Muskeln (aus Rohen).

Der Muskel *biceps brachii* besitzt einen längeren Kraftarm und muss deshalb eine geringere Kraft ausüben als der *brachialis*, um eine gleich große Last zu halten oder zu bewegen. Der Muskel *brachialis* sitzt näher am Gelenk, hat einen kleineren Kraftarm und kann dafür schnellere Bewegungen des Unterarms ausführen.

Am hinteren Oberarm befindet sich der Muskel *triceps brachii*, der mit einem ungünstigen Angriffspunkt (kürzerer Kraftarm) für das Senken des Unterarms verantwortlich ist.

Die Funktion des M. *brachioradialis* ist, die Spannungserhöhung im Unterarmknochen, die durch den Zug der Beugemuskeln verursacht wird, entgegenzuwirken (Bild 4.1.1.2) und dadurch die Bruchgefahr bei hoher Belastung zu verringern.

Wenn der Bizeps allein die Last heben oder halten würde (Bild a), würden die Biegespannungen im Bereich des Oberarmknochens gering, aber die Spannung im Bereich des Unterarms groß sein. Umgekehrte Aussagen gelten, wenn nur der M. *brachioradialis* eingesetzt würde (Bild b). Die ideale Herabsetzung der Biegebeanspruchung ergibt sich bei Einwirkung beider Muskeln (Bild c) [Benninghoff (1994)]. Im Bild ist nur ein Unterarmknochen dargestellt.

In der Realität besitzt der Unterarm zwei parallel zueinander angeordnete Knochen, Elle und Speiche, die eine Drehbewegung des Handgelenks ermöglichen.

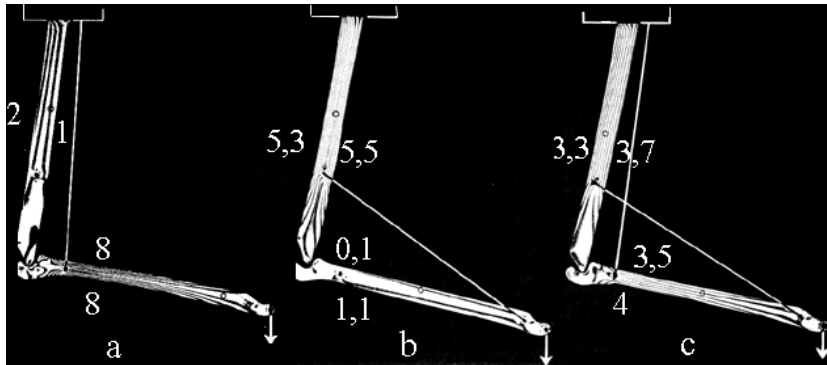


Bild 4.1.1.2: Verursachte Biegebeanspruchung in  $\text{N/cm}^2 \cdot 10^2$  bei gleicher Last (3 kg) durch den M. *biceps brachii* (a) und durch den *brachioradialis* (b). Verbesserung der Spannungsverteilung (c) bei Einwirkung beider Muskeln [aus Benninghoff (1994)].

## Gleichgewicht am Arm

Ein einfaches physikalisches Modell für den Unterarm sieht folgendermaßen aus (Bild 4.1.1.3):

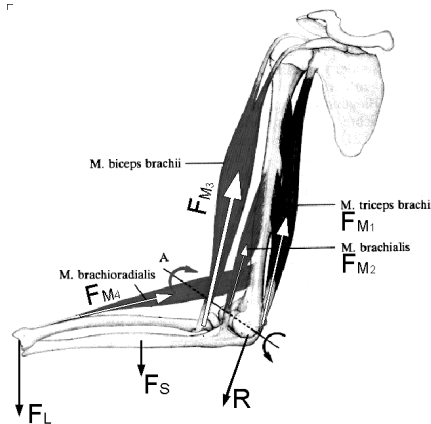


Bild 4.1.1.3: Vereinfachtes Schema eines Armmodells.

$F_{M1}$ : M. *triceps brachii*

$F_{M2}$ : M. *brachialis*

$F_{M3}$ : M. *biceps brachii*

$F_{M4}$ : M. *brachioradialis*

$F_S$ : Gewichtskraft des Unterarms

$F_L$ : Kraft durch die Last

$R$ : Kraft, die das Ellbogengelenk auf den Unterarm ausübt.

Die Vektorlängen und die Richtung von  $R$  sind nicht maßstabsgerecht.

Das Gleichgewicht besteht dann, wenn die Summe der linksdrehenden Drehmomente gleich der Summe der rechtsdrehenden ist, bzw. wenn gilt:

$$F_{M1} \times a_{M1} + F_S \times l/2 + F_L \times l + F_{M2} \times a_{M2} + F_{M3} \times a_{M3} + F_{M4} \times a_{M4} = 0.$$

wobei  $a_{M1}$ ,  $a_{M2}$ ,  $a_{M3}$ ,  $a_{M4}$  und  $l$  die Kraftarme sind.

Gleichzeitig muss aber auch für die Summe der Kräfte gelten:

$$F_{M1} + F_{M2} + F_{M3} + F_{M4} + F_S + F_L + R = 0,$$

In der Schule wird dieses Modell in der Regel auf einen einseitigen Hebel reduziert, an dem nur eine Muskelkraft angreift (Bild 4.1.1.4) [Pagonis (1999)].

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einführung

Man zeigt den Schülerinnen und Schülern ein Schnittbild eines menschlichen Armes, damit sie eine Vorstellung über den Aufbau eines realen menschlichen Armes bekommen. Gleichzeitig kann man auch schon eine erste Einführung in die Funktionen der einzelnen Muskeln und Knochen geben.

## 2. Einführung des einseitigen Hebels

Als starke Vereinfachung betrachtet man einen Arm, bei dem die Muskelkräfte, die die Last halten, als eine einzelne, nach oben ziehende Kraft  $F_M$  (praktisch der Bizeps) dargestellt werden. Das Modell wird am günstigsten aus Balsaholz (Bild 4.1.1.5) gebaut, damit kann man zunächst zur Vereinfachung das sehr kleine Eigengewicht vernachlässigen.

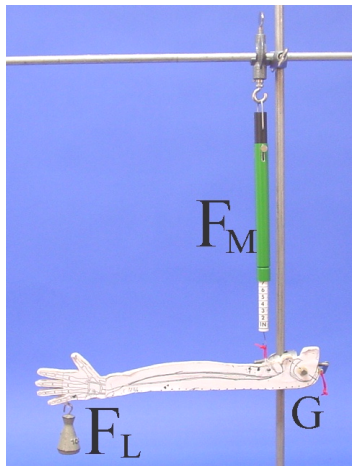


Bild 4.1.1.5: vereinfachtes Armmodell als Hebel

Der einseitige Hebel hat z. B. einen Kraft- bzw. Lastarm von  $l_M = 2,5 \text{ cm}$  bzw.  $l_L = 25 \text{ cm}$ .

Der Bizeps wird durch eine eingehängte Feder dargestellt. Das angehängte Gewicht simuliert die Last  $F_L$ . Der Drehpunkt ist am Rahmen fixiert.

Nun sollen die Schülerinnen und Schüler die beiden Kräfte miteinander vergleichen:

Die Last  $F_L$  dreht den Unterarm gegen den Uhrzeigersinn. Die Kraft  $F_M$  hingegen dreht den Unterarm im Uhrzeigersinn. Die Kraft  $F_M$  ist viel größer als die Kraft  $F_L$ . Aber die Angriffspunkte liegen unterschiedlich weit von der Drehachse  $G$  entfernt. Zu der größeren Kraft gehört der kleinere Abstand und umgekehrt. Für die Wirkung ist also nicht nur der Betrag der Kraft, sondern auch der Abstand des Angriffspunktes von der Drehachse von Bedeutung.

## 3. Drehmoment und Drehmomentgleichgewicht – das Hebelgesetz (quantitativ)

Als nächstes wird das Problem gestellt, wann der Arm im Gleichgewicht ist. Es werden einige Messungen mit verschiedenen Lasten durchgeführt, um daraus die Beziehungen zwischen den Kräften und Hebelarmen für den Gleichgewichtszustand zu finden. (Die obere Federanhängung wird je nach Last vertikal so verschoben, dass der Unterarm wieder in der horizontalen Lage ist).

Wenn im Modell z. B. der Lastarm 10 mal größer als der Muskelarm gewählt wird, ist es für die SchülerInnen leicht festzustellen, dass beim Gleichgewicht Last mal Lastarm = Kraft mal Kraftarm ( $F_M \cdot l_M = F_P \cdot l_P$ ) ist. Damit ist klar, dass das Produkt aus Kraft und Abstand von der Drehachse die hier für das Gleichgewicht relevante Größe ist. Diese Größe bekommt wegen ihrer Bedeutung für die Gleichgewichtsbedingung einen eigenen Namen: **Drehmoment**. (Selbstverständlich müssen für einen quantitativen Vergleich die Lastgewichte in dieselbe Einheit wie die vom Kraftmesser angezeigten Werte umgewandelt werden.)

Jetzt kann mit Hilfe dieses Begriffs die Gleichgewichtsbedingung formuliert werden:

*Im Gleichgewicht ist das linksdrehende Drehmoment gleich dem rechtsdrehenden Drehmoment.*

An dieser Stelle kann man die übliche Bezeichnung „einseitiger Hebel“ für die Anordnung einführen

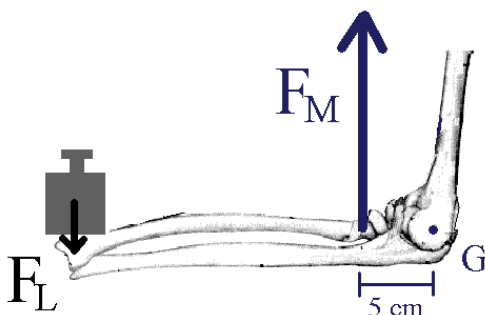


Bild 4.1.1.4: Einarmiger Hebel als Armmodell

#### 4. Allgemeine Fassung des Drehmoments (optional)

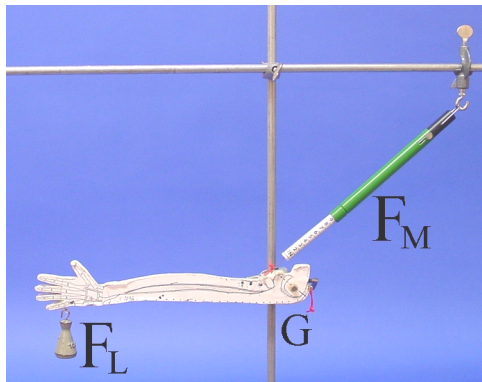


Bild 4.1.1.6: Schräg nach oben ziehende Muskelkraft beim leicht gestreckten Arm.

Man betrachtet nun den Fall, dass der Arm etwas gestreckt ist. Die vom Muskel ausgeübte Kraft zieht dann schräg nach oben (Bild 4.1.1.6). Die Schüler werden feststellen, dass die notwendige Kraft in diesem Fall zur Erhaltung eines Gleichgewichts bei gleicher Last größer sein muss. Das heißt, die maximale Wirkung wird erreicht, wenn die Kraft senkrecht nach oben gerichtet ist.

Falls es als zweckmäßig angesehen wird, kann der Betrag des jetzt wirkenden Drehmomentes über das Produkt aus senkrechter Kraftkomponente mit dem Kraftarm definiert werden:  $F_{\perp} \cdot L$  (oder als Produkt aus Kraftbetrag mit dem Abstand des Lotes von der Drehachse auf die Wirkungslinie).

#### 5. Zweiseitiger Hebel

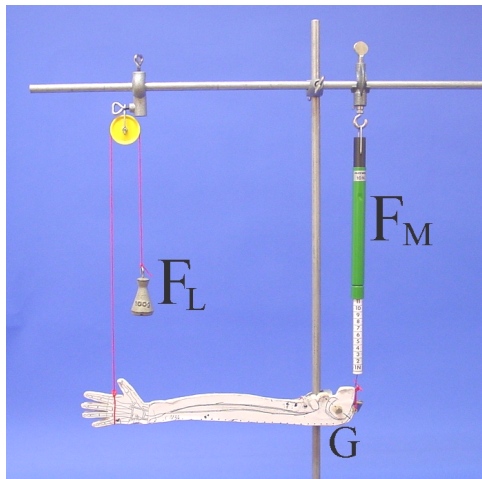


Bild 4.1.1.7: Gleichgewicht bei Betrachtung der Trizepskraft.

Als nächstes betrachtet man die Bedingungen für das Gleichgewicht, wenn die Trizepskraft nach oben zieht und die Lastkraft ebenfalls nach oben zieht (Bild 4.1.1.7). Dies ist z.B. beim Heben einer Last mit Hilfe eines Seils und einer festen Rolle der Fall. Man nimmt  $L_M = 2 \text{ cm}$  (Kraftarm des Trizeps) und  $L_L = 25 \text{ cm}$  (Lastarm) an. Außerdem nimmt man an, dass die Kraft senkrecht nach oben zieht.

Einige Messungen mit verschiedenen Lasten führen zu dem Ergebnis, dass das Hebel-Gesetz auch beim zweiseitigen Hebel gilt und die notwendige größere Kraft bei dem Versuch mit dem Trizeps von der ungünstigeren Länge des zugehörigen Hebelarms herkommt.

Das Hebelgesetz wird anhand der auch sonst üblichen Beispiele nun weiter geübt.

#### 6. Verallgemeinerung

Wenn man Beispiele wie Gleichgewichtsbedingungen und Belastungen bei Kauapparaten behandeln will, ist es zweckmäßig auch den Fall zu behandeln, bei dem die Hebelarme einen Winkel ungleich  $0^\circ$  oder  $180^\circ$  bilden.

Versuche zeigen, dass dieselben Bedingungen zur Erhaltung eines Gleichgewichts gelten, wie in 2. oder allgemein in 3. beschrieben (Bild 4.1.1.8).

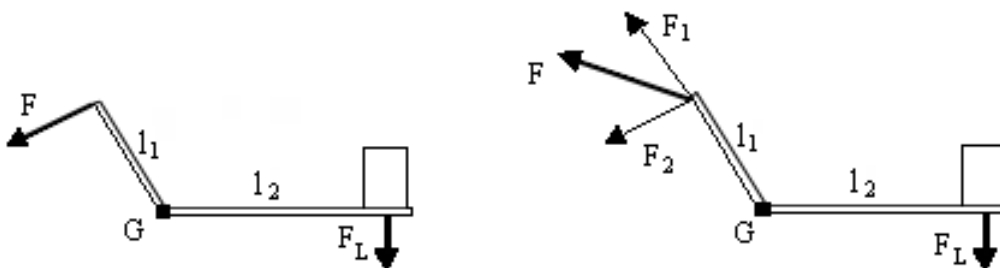


Bild 4.1.1.8: Gleichgewicht bei nicht-kollinearen Hebelarmen  
(linkes Bild:  $F \cdot l_1 = F_L \cdot l_2$  bzw. rechtes Bild:  $F_2 \cdot l_1 = F_L \cdot l_2$ )



## 7. Der Schwerpunkt

Die Schülerinnen und Schüler werden darauf hingewiesen, dass zur Vereinfachung das Armmodell aus einem sehr leichten Material hergestellt wurde. Dadurch konnte vernachlässigt werden, dass der Unterarm schon aufgrund seines Eigengewichts nach unten gedreht wird. Als Hinführung zum Begriff des Schwerpunktes, der bei den Themen Wirbelsäule und Standfestigkeit benötigt wird, kann nun das Problem aufgeworfen werden: Wie hat die Gleichgewichtsbedingung auszusehen, wenn man das Eigengewicht berücksichtigt?

Wegen der kontinuierlichen, aber über die Armlänge  $L$  unterschiedlichen Verteilung der Masse ist eine einfache Antwort nicht zu erwarten. Zur Vereinfachung benutzen wir nun ein Armmodell mit einer kontinuierlichen, aber gleichmäßigen Massenverteilung. Es besteht aus einer flachen, leichten Leiste, auf die mit einer Nut versehene Brettstücke aufgesteckt werden können. (Bild 4.1.1.9).

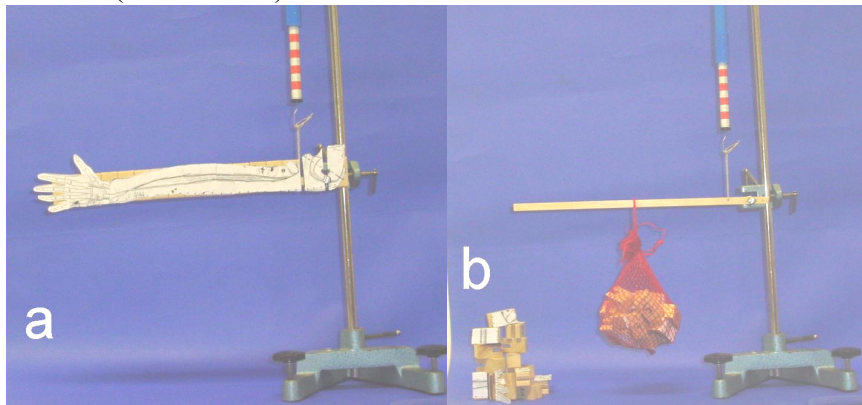


Bild 4.1.1.9: a) Das Armmodell ist unterteilt in 14 gleiche Teile. b) Werden alle Teile bei  $L/2$  angehängt, ergibt sich das gleiche Drehmoment.

Bei 14 Teilen hat man die Wirkung von 14 Drehmomenten zu berücksichtigen. Gibt es eine Möglichkeit, die Wirkung der 14 Drehmomente durch die eines einzigen zu ersetzen, das relativ einfach bestimmt werden kann?

Man kann die Vorgabe machen, dass das Ersatzdrehmoment so konstruiert werden soll, dass die Gesamtmasse in einem noch zu bestimmenden sehr kleinen, praktisch punktförmigen Volumen vereinigt ist. Das Problem besteht dann darin, diesen Punkt bei gegebener Gesamtmasse und Drehachse zu bestimmen.

Man kann die Schülerinnen und Schüler intuitive Lösungsansätze vermuten lassen, ggf. als Denkansatz die dem jungen Gauß nachgesagte Lösung für die Summe der ersten 50 natürlichen Zahlen nahe legen: Die Summe der beiden Drehmomente für die beiden Randstücke ist z.B. ( $a$  ist die Breite eines der schmalen Stücke,  $m$  seine Masse):

$$mg \cdot a/2 + mg \cdot (L-a/2) = 2m \cdot g \cdot L/2,$$

also, ein Drehmoment, dass man sich durch die Summe der beiden Gewichtskräfte entstanden denken kann, wobei diese resultierende Kraft aber in der Mitte angreift.

Jedes weitere von beiden Seiten her innen anschließende Paar liefert das selbe Ergebnis. Zusammengefasst können wir in unserem Beispiel die Wirkung der vielen einzelnen Drehmomente der gleichmäßigen Stange durch ein einziges ersetzen. Dies ist so bestimmt, dass die gesamte Masse in einem Punkt vereinigt vorgestellt wird, der in der Mitte liegt. Das dadurch entstehende Drehmoment dreht zusätzlich zu dem Drehmoment der Last.

*Wie kann der Schwerpunkt bei komplizierterer Verteilung der Masse bestimmt werden?*

Wenn man sich als Gedankenexperiment vorstellt, dass die Masse eines Körpers in einem Punkt zusammengezogen ist (ansonsten bleibt der Körper als gewichtslose Hülle bestehen), dann darf er sich nicht drehen, wenn er in diesem Punkt unterstützt wird, denn dann kann es keine Drehmomente aufgrund der Schwerkraft geben. Bei jedem Körper lässt sich ein solcher Punkt finden, auch wenn der Körper unsymmetrisch ist und die Masse ungleich verteilt ist. Diesen Punkt nennt man **Schwerpunkt** (oder **Massenmittelpunkt**).

Bei ebenen, flächenhaften Körpern kann man auf diese Weise den Schwerpunkt bestimmen und damit das Drehmoment bezüglich einer gegebenen Achse angeben:



$$M = m_{\text{ges}} \cdot a_s,$$

wobei  $m_{\text{ges}}$  die gesamte Masse und  $a_s$  der kürzeste Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse ist.

Wie kann man den Schwerpunkt eines räumlich ausgedehnten Körpers bestimmen? Offensichtlich muss folgendes gelten: Hängt man den Körper frei drehbar an irgendeinem seiner Oberflächenpunkte auf, dann dreht er sich solange, bis sich der Schwerpunkt senkrecht unter dem Aufhängepunkt befindet. Dann gibt es kein Drehmoment mehr. Damit ist ein Strahl festgelegt, auf dem sich der Schwerpunkt befindet. Ein zweiter Aufhängepunkt liefert einen zweiten Strahl und der Schnittpunkt mit dem ersten Strahl legt den Schwerpunkt fest.



Bild 4.1.1.10: Bestimmung des Schwerpunktlots

Bei einem flächigen Körper wird demonstriert, dass beide Verfahren das gleiche Ergebnis liefern. Versuchsanordnung zur Bestimmung des Schwerpunktlots: Vor allem für die Behandlung der Standfestigkeit ist die folgende Versuchsanordnung nützlich. Ein gleichseitiges Dreieck wird symmetrisch durch drei Druckfederkraftmesser unterstützt (Bild 4.1.1.10). Die drei Kraftmesser zeigen genau dann gleiche Werte an, wenn das Lot des Schwerpunktes eines auf die dreieckige Platte gestellten Körpers durch den Mittelpunkt der Platte geht (dann gibt es kein Drehmoment). Auf diese Weise kann sehr schnell das Lot des Schwerpunktes gefunden werden.

## 4.1.2. Statik des Kauapparates

Im Laufe der Zeit haben sich die Tiere ihrer Umgebung angepasst, alle Körperteile bilden in der Regel eine zum Überleben optimale Struktur aus. Die heutige Form eines Körperteils ist das Resultat einer ganzen Reihe von Faktoren, die zusammengewirkt haben. Schädel- und Kieferformen sowie die Kopfmuskeln werden durch die spezifischen Funktionen, die von den einzelnen Organen ausgeübt werden, bestimmt. Die Entwicklung des Gebisses ist mit verschiedenen Faktoren wie der Nahrungsaufnahme, der Art der Nahrung und ihrer Verarbeitung eng korreliert, welche eine bestimmte Form und Größe der Kieferknochen bewirkt haben.

Bei den frühen, primitiven Landtieren war nur ein flacher Unterkiefer vorhanden, der aus vielen kleinen Knochen aufgebaut war. Er besaß nur einen großen Kieferschließmuskel, der für das Schließen des Maules verantwortlich war. Mit der Zeit formte sich aus den diversen Unterkieferknochen ein großer, zusammenhängender Knochen (Dentale) und am hinteren Ende des Unterkiefers ein höckerförmiger Knochenfortsatz (processus coronoideus). Aus dem ursprünglichen, großen Kiefermuskel bildeten sich viele Muskeln, die in weit auseinander liegenden Richtungen verliefen.

### A. Basiswissen über Anatomie und Statik von Unterkiefern

#### Statik des Unterkiefers der Reptilien

Wenn das Maul eines Krokodils die Beute hält, muss ein Gleichgewichtszustand erreicht sein. Es muss daher sowohl die Summe der Drehmomente (um einen beliebig gewählten Punkt) als auch die Vektorsumme aller Kräfte, die im Unterkiefer wirken, Null sein.

Wenn wir nur die wichtigsten Kräfte betrachten (Bild 4.1.2.1), gilt:

$$F_K \cdot a_K - F_M \cdot a_M = 0 \quad \text{und} \quad F_K - F_M + R = 0$$

wobei  $F_K$  die Reaktionskraft beim Zubeißen (plus die Gewichtskraft der Beute),  $F_M$  die Muskelkraft, die für das Schließen des Maules verantwortlich ist,  $R$  die vom Gelenk (G) ausgeübte Kraft ist,  $a_K$  und  $a_M$  die Kraftarme von den Wirkungslinien der Kräfte  $F_K$  und  $F_M$  bezüglich des gewählten Drehpunkts G sind.

Kaukräfte und Belastung am Gelenk hängen im Allgemeinen von der Länge des Unterkiefers ab, aber auch von der Krokodilart. Bei einem jungen Kaiman mit einem ca. 10 cm langen Unterkiefer wird an der Spitze des Maules eine Kaukraft bis zu 70 N ausgeübt. Die Belastung am Gelenk beträgt dabei bis zu 250 N [Cleuren (1995)].

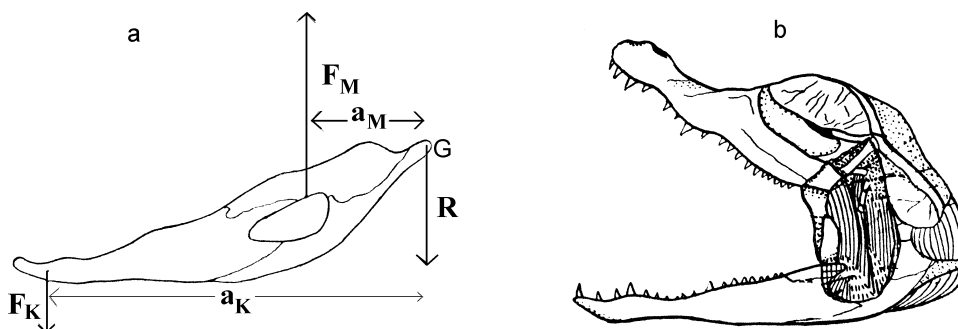


Bild 4.1.2.1: Vereinfachtes Schema von Kaukräften beim Unterkiefer eines Reptils (a), wobei  $F_K$  die Reaktionskraft,  $F_M$  die schließende Muskelkraft und  $R$  die Belastung des Gelenks ist. (b) Muskeln beim Unterkiefer eines Krokodils [nach Iordansky (1964)].

## Statik des Unterkiefers der Säugetiere

Die auf den Unterkiefer eines Säugetieres wirkenden Kräfte sind (Bild 4.1.2.2):

- $F_K$ : Reaktionskaukraft.
- $F_T$ : *M. temporalis* (Schläfenmuskel), der am *processus coronoideus* anheftet;
- $F_M$ : *M. masseter* und *M. pterygoideus*, die schräg nach oben-vorne ziehen;
- $R$ : Kraft auf das Gelenk.

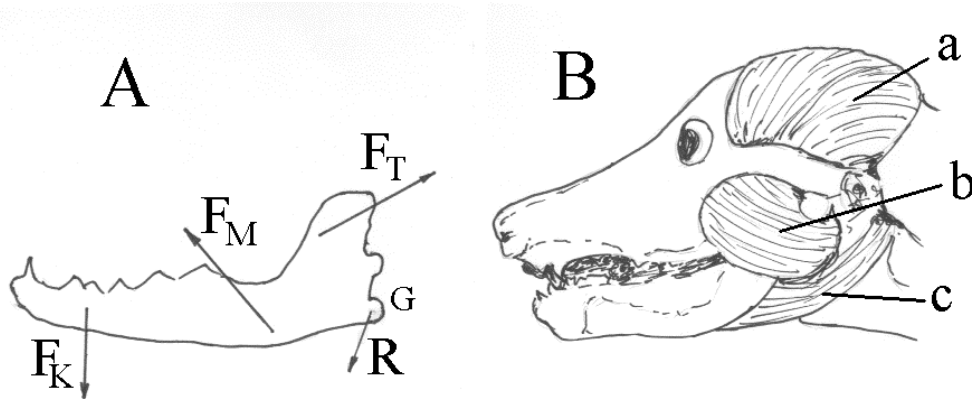


Bild 4.1.2.2, links: Kräfte auf den Unterkiefer eines Säugetieres (Hund). Rechts: Muskeln an einem Hundekopf: (a) *M. temporalis*, (b) *M. masseter* und (c) *M. digastricus*, die zur Senkung des Unterkiefers dienen. Die *M. pterygoideus* sind nicht abgebildet, weil sie sich im Inneren befinden.

Der Betrag des Gesamtdrehmoments um den Drehpunkt  $G$  ist  $a_K \cdot F_K - a_T \cdot F_T - a_M \cdot F_M$  und muss gleich Null für den Gleichgewichtszustand sein ( $a_K$ ,  $a_M$  und  $a_T$  sind die Kraftarme der Vektoren vom Gelenk (positive Richtung gegen den Uhrzeigersinn)).

Die Reaktionskaukraft  $F_K = (a_T \cdot F_T + a_M \cdot F_M) / a_K$  ist um so größer je kleiner  $a_K$  ist, es werden die größten Kaukräfte also mit den Backenzähnen ausgeübt.

Die Kraft  $R$  (Belastung des Gelenks) auf die Drehachse ist durch die Vektorsumme aller Kräfte gegeben

$$R = - (F_K + F_T + F_M)$$

$R$  ist nie groß, weil sich immer Teile der Kraftkomponenten  $F_K$ ,  $F_T$  und  $F_M$  aufheben.

## Statik des menschlichen Unterkiefers

Im Gleichgewichtszustand (Bild 4.1.2.3) gelten für die Kräfte, die für die Schließbewegungen des menschlichen Unterkiefers verantwortlich sind, die gleichen Formeln wie für die anderen Säugetiere:

$$F_K + F_M + F_T + R = 0 \quad \text{und}$$

$$F_K \cdot a_K - F_M \cdot a_M - F_T \cdot a_T = 0.$$

Bei Menschen hängt die Größe der Kraft von der Benutzung der Zähne bzw. von der Art der Nahrung ab. Die Belastung der Schneidezähne liegt im Mittel bei 250 N, die Belastung der Prämolaren (Eckzähne) bei 400 N und der Molaren (Backenzähne) bei 700 N. Durch Übung können diese Werte auch verdoppelt werden [Jansen (1994); Schumacher (1990)].

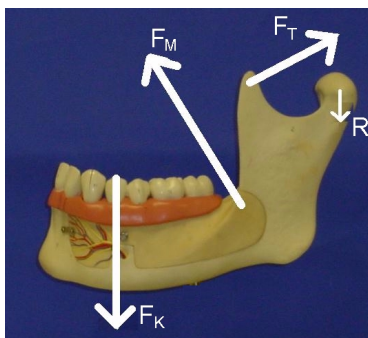


Bild 4.1.2.3: Kaukräfte beim menschlichen Unterkiefer, wobei  $F_K$  die Reaktionskaukraft,  $F_M$  die Kraft durch *M. masseter* und *M. pterygoideus*,  $F_T$  die Kraft durch *M. temporalis* und  $R$  die Belastung des Gelenks ist.

### Physikalische Überlegenheit der Unterkiefer der Säugetiere gegenüber den Reptilien

Um die physikalische Überlegenheit der Unterkiefer der Säugetiere gegenüber den Reptilien zu demonstrieren, nehmen wir den Unterkiefer eines Krokodils und fügen ihm noch einen Knochenfortsatz, den „*processus coronoideus*“, hinzu, so wie ihn die Säugetiere besitzen (Bild 4.1.2.4). Anstelle der großen Muskelkraft  $F_M$ , die das Krokodil einsetzen muss, greifen nun zwei Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  an, deren Angriffspunkte den gleichen Abstand vom Gelenk wie  $F_M$  haben und deren Summe der Beträge gleich  $F_M$  ist.

Die zwei Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  üben denselben Effekt auf die Rotation aus wie  $F_M$  (sie haben zusammen dasselbe Drehmoment), und zwar heben sie das Drehmoment der Kraft  $F_K$  auf. Man kann nun die Richtung der beiden Kräfte so wählen, dass die Vektorsumme  $F_1 + F_2 + F_K = 0$  wird, d.h. dass die Resultierende der beiden Kräfte  $F_1 + F_2$  gleich groß und entgegengesetzt gerichtet der Kraft  $F_K$  ist. Damit ist  $R = 0$ .

Die physikalische Überlegenheit ist klar: Die zwei Kräfte, deren Summe gleich groß ist wie die zu ersetzende, sind anatomisch günstiger, denn sie können denselben Effekt produzieren, ohne dass das Gelenk durch eine Kraft  $R$  belastet wird.

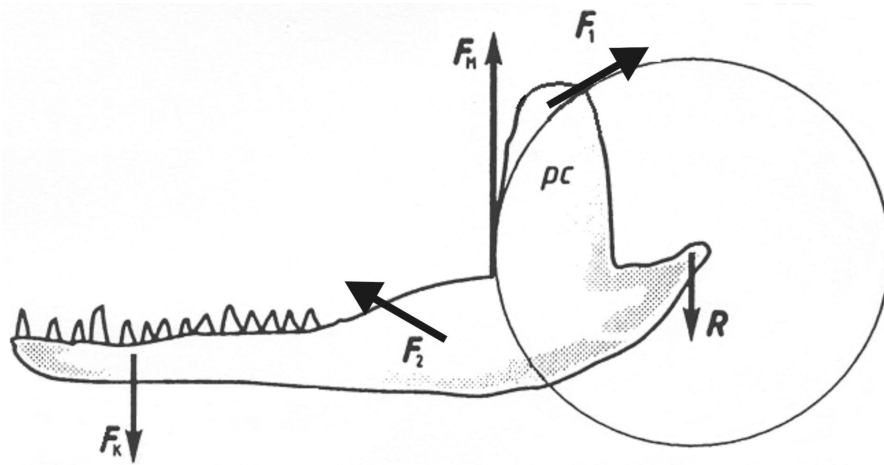


Bild 4.1.2.4: Unterkiefer eines Krokodils, versehen mit einem *processus coronoideus* (pc). Die Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  ersetzen mit dem gleichen Effekt die Kräfte  $F_M$  und  $R$ .  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_M$  liegen tangential am selben Kreis.

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einführung

Der Lehrer zeigt den Schüler z. B. die Schädel in Bild 4.1.2.5 und gibt eine Einführung über die Evolution der Kauapparate von den primitiven Tieren bis zu den Säugetieren bzw. den Menschen. Da die ganze Einheit auf dem Aufbau der Unterkiefer basiert, sollte dabei hervor-gehoben werden, dass die Verkürzung des Unterkiefers und das Hinzukommen des processus coronoideus wesentlich für die Entwicklung der heute vorliegenden Unterkiefer der Säugetiere war.

Die Evolution der Kiefer ermöglichte eine bessere Nutzung unterschiedlicher Nahrungsarten, was für die Warmblüter wichtig war, da sie zum Ausgleich des Wärmeverlustes mehr Nahrung zu sich nehmen müssen.

Den SchülerInnen wird mitgeteilt, dass die Einheit das Ziel hat, ihnen zu zeigen, dass die Unterkiefer der heutigen Säugetiere physikalisch günstiger gestaltet sind als die Unterkiefer der Tiere in prähistorischer Zeit oder als die Unterkiefer der säugetierähnlichen Reptilien.

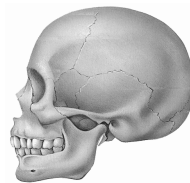


Bild 4.1.2.5: Schädel eines Gaviales (aus Museum der vergleichenden Anatomie, Bologna) und eines Menschen

### 2. Gleichgewicht beim Krokodilunterkiefer – Belastung des Gelenks

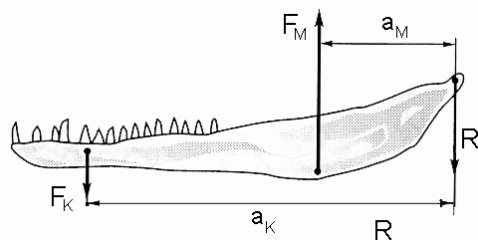


Bild 4.1.2.6: Einwirkende Kräfte auf den Krokodilunterkiefer beim Zubeißen

Nach der Einführung in Schritt 1 wird anhand einer Folie diskutiert, welche Kräfte auf den Unterkiefer des Krokodils während des Zubeißens einwirken. Bei einem realen Krokodilunterkiefer liegen die Angriffspunkte der Kräfte nicht auf einer Linie. Zur Vereinfachung darf aber angenommen werden, dass Kraft- und Hebelarme zueinander senkrecht sind (Bild 4.1.2.6). Diese Kräfte können mit Hilfe eines Modells, das man relativ leicht aus Sperrholz oder besser Balsaholz aussägt und an einem Rahmen be-

festigt, veranschaulicht werden (Bild 4.1.2.7).  $R$  ist die Reaktionskraft, die das Gelenk nach unten ausübt,  $F_K$  die Kraft, die das Fleisch nach unten ausübt und  $F_M$  die Kraft, die der Kau-muskel nach oben ausübt.

*Zahlenbeispiel:*

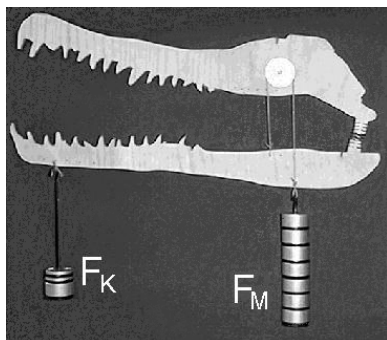


Bild 4.1.2.7: Modell zur Veranschaulichung von Kräften bei Krokodilunterkiefer

Für ein ausgewachsenes Krokodil mit einer Gesamtlänge von ca. 3 m gilt:  $a_K = 50$  cm;  $a_M = 10$  cm.

Wählt man z.B.  $F_K = 100$  N, so ergibt sich:

$$F_K \cdot a_K = F_M \cdot a_M$$

$$100 \text{ N} \cdot 50 \text{ cm} = F_M \cdot 10 \text{ cm} \Rightarrow F_M = 500 \text{ N}$$

Für die Gelenkbelastung erhält man:

$$R = - (F_M + F_K) \Rightarrow R = 400 \text{ N}$$

Die Kraft auf das Gelenk ist das Vierfache der Kaukraft!

Mit Hilfe des Modells und der Rechnung wird deutlich, dass auf das Gelenk eine große Kraft wirkt. Die Belastung des Gelenks hängt von  $F_K$ ,  $F_M$  und ihren Entfernungen von dem Gelenk ab. Es ist klar, dass ein wenig oder gar nicht belastetes Gelenk günstiger ist (Abnutzung, Materialersparnis etc.).

### 3. Vergleich der Unterkiefer von Krokodil und Mensch – Reduktion der Gelenkbelastung

Vergleicht man mit Hilfe des Modells (Bild 4.1.2.8) die Belastung des Gelenks beim Krokodil und beim Menschen, so stellt man fest, dass das menschliche Kiefergelenk wesentlich geringer belastet ist. (Im Modell ist die Feder am menschlichen Unterkiefer weniger zusammengedrückt.) Die Überlegungen, woran dies liegen könnte, führen zum Einen auf die unterschiedliche Form bzw. Länge, zum Anderen darauf, dass beim Menschen, vereinfacht, zwei Muskelkräfte angreifen.

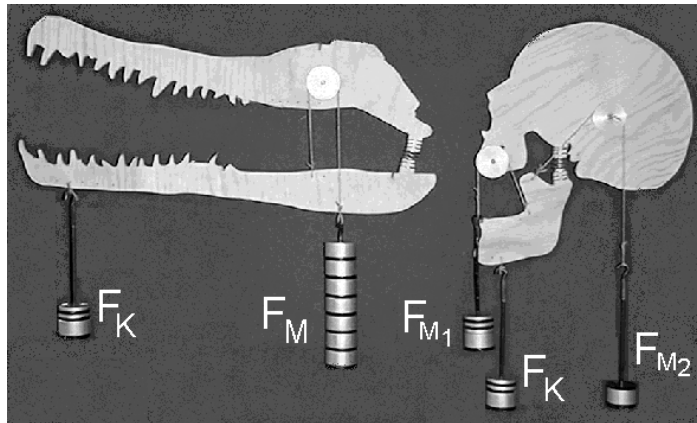


Bild 4.1.2.8: Modelle zum Vergleich der Kaukräfte von Krokodil und Mensch

Die SchülerInnen sehen, dass bei gleicher Kaukraft  $F_K$ , die Belastung im „menschlichen“ Gelenk (Belastung der Feder) kleiner ist und dass sie fast Null sein kann, wenn  $F_{M1}$  und  $F_{M2}$  bestimmte Richtungen und Werte haben.

Die SchülerInnen sehen, dass bei gleicher Kaukraft  $F_K$ , die Belastung im „menschlichen“ Gelenk (Belastung der Feder) kleiner ist und dass sie fast Null sein kann, wenn  $F_{M1}$  und  $F_{M2}$  bestimmte Richtungen und Werte haben.

### 4. Krokodilunterkiefer mit „processus coronoideus“

Eine Antwort auf die Frage, wie ein Unterkiefer beschaffen sein muss, damit die Gelenkbelastung praktisch verschwinden kann, ist für die SchülerInnen ohne deutliche Hilfe nicht möglich. Um die These zu bekräftigen, dass der Knochenfortsatz (*processus coronoideus*) und das Angreifen zweier Kräfte für die geringere Gelenkbelastung verantwortlich sind, konstruieren wir ein Krokodilmaul mit Knochenfortsatz. An einer Magnettafel werden Ober- und Unterkiefer, der *processus coronoideus* und die Kraftpfeile aus Tonpapier, bzw. dünnem Holz befestigt (vgl. Bild 4.1.2.9). Nun betrachtet man in mehreren Schritten, wie sich die Kraft auf das Gelenk verändert, wenn die beiden Kräfte in unterschiedlichen Winkeln angreifen. In höheren Klassen der Mittelstufe kann dies als Vertiefung formal erarbeitet werden. Eine einfachere Behandlung kann qualitativ anhand dieser Bildfolge erfolgen.

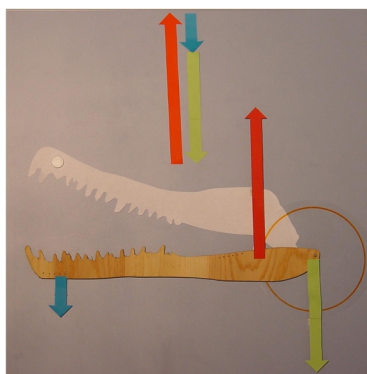


Bild 4.1.2.9a: Angreifende Kräfte an einem Krokodilunterkiefer. Es herrscht ein Drehmomentesgleichgewicht und ein Kräftegleichgewicht. Die Gelenkbelastung ist hoch.

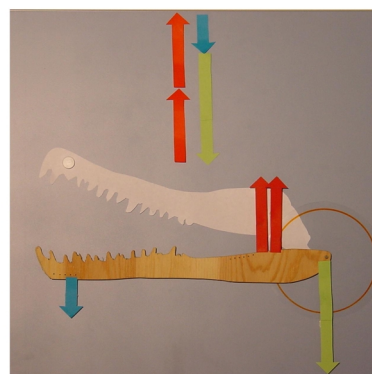


Bild 4.1.2.9b: Die Muskelkraft wurde in zwei gleich große Kräfte zerlegt, dies ändert nichts an den übrigen Größen.



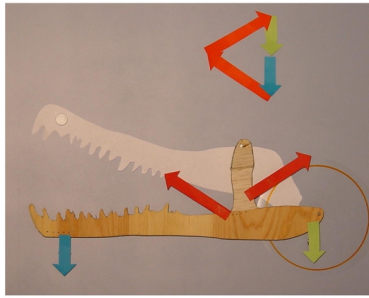


Bild 4.1.2.9c: Dem Krokodilunterkiefer wird ein *processus coronoideus* angefügt. Verschiebt man die beiden Kraftpfeile auf einer Kreislinie, so bleibt das Drehmoment gleich (nur der Angriffspunkt wurde verändert, Kraft und Kraftarm bleiben gleich). Addiert man die Kraftvektoren so stellt man fest, dass die Gelenkbelastung geringer wird.

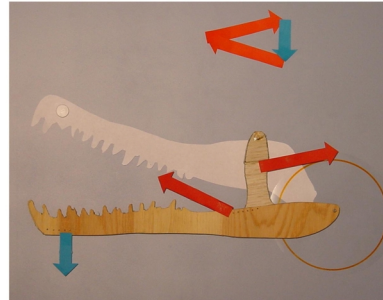


Bild 4.1.2.9d: Verschiebt man die Kraftpfeile weiter auf der Kreislinie, bleibt das Drehmomentgleichgewicht erhalten. Es kann der Punkt erreicht werden, in dem die Gelenkbelastung verschwindet.

Danach kann durch die Demonstrationsanordnung von Bild 4.1.2.10 bestätigt werden, dass das Hinzufügen eines Knochenfortsatzes und die Zerlegung der Muskelkraft in zwei Komponenten zu einer Reduktion der Gelenkbelastung führt.

Die Kaukraft ist durch eine Druckfeder ( $F_K$ ), die Muskelkräfte durch Kraftmesser ( $F_M$ ) und die Belastung auf das Gelenk durch drei Gummibänder dargestellt. Der Oberkiefer ist am Rahmen fest fixiert, daher spielt er keine Rolle.

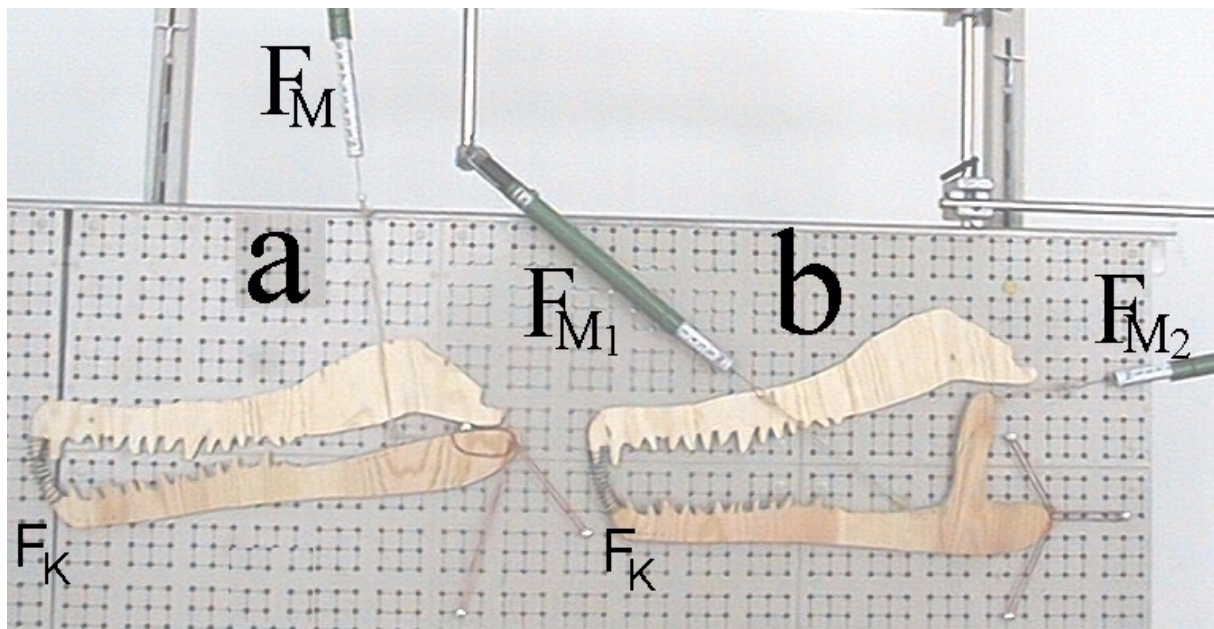


Bild 4.1.2.10: Modell eines Krokodilmaules (a) und eines Krokodilmaules mit *processus coronoideus* (b).

Die drei Gummibänder greifen an dem Gelenk des Modells an. Sie sind im unbelasteten Zustand gleich lang und haben jeweils einen Winkel von etwa  $120^\circ$  zueinander. Bei Belastung des Gelenks ändern sich die Winkel und die Längen. Sie vermitteln gut die Vorstellung von einer Belastung. Außerdem helfen sie die Stabilität des Systems Modell + Kräfte zu gewährleisten.

Bei Verschiebung der Feder zwischen den Zähnen in Richtung Gelenk wird beobachtet, wie sich die Kraft am Federkraftmesser ( $F_M$ ) ändert, um die gleiche Spannung der Feder zu halten. Ebenfalls beobachtet werden kann, wie sich die Spannung der Gummibänder am Gelenk ändert.

Verändert man den Abstand des Federkraftmessers  $F_M$  vom Gelenk wird beobachtet, wie sich die Anzeige ändert, um die gleiche Spannung  $F_K$  der Druckfeder zu halten. Beobachtet werden kann ebenfalls, wie sich die Spannung der Gummibänder am Gelenk ändert.

In Übereinstimmung mit dem Hebelgesetz kann man nochmals feststellen, dass je entfernter die Gerade, die die Kaukraft  $F_K$  enthält, vom Gelenk  $G$  ist, desto größer muss die Muskelkraft  $F_M$  sein. Mit Hilfe des Modells kann die Frage, wo die Muskeln am günstigsten angreifen, gut diskutieren und die zugehörigen Antworten überprüft werden.

Die Funktion des menschlichen Unterkiefers entspricht im Prinzip dem des Krokodilunterkiefers mit hinzugefügtem *processus coronoideus*.

## **6. Abschließende Diskussion**

Bei einer die Unterrichtseinheit abschließenden Diskussion über die physikalische Überlegenheit des menschlichen Kauapparates sollten die wichtigsten physikalischen Begriffe und Gesetze wiederholt werden. Hervorzuheben ist, dass ein Gleichgewichtszustand bei Unterkiefern sowie auch bei allen mechanischen Systemen nur vorhanden ist, wenn die Summe aller Drehmomente und die Summe aller Kräfte null ist.



### 4.1.3 Belastung der Wirbelsäule

Wegen der Schwerkraft entstehen beim Körper bzw. Körperteilen Drehmomente, die von dem Drehpunkt und dem Ort des Schwerpunkts abhängen. Der Schwerpunkt eines Körpers ändert sich je nach der Lage, die der Körper einnimmt. Bei einem Mensch in normal aufrechter Position liegt der gesamte Körperschwerpunkt ungefähr in der Höhe des Nabels. Beugt man die Beine oder hebt man die Arme über den Kopf, dann verschiebt sich der Schwerpunkt.

Um das Gleichgewicht beim Stehen zu gewährleisten muss das Lot des Körperschwerpunkts immer in die Standfläche fallen, die durch die Fläche der Füße bestimmt wird. Wie der ganze Körper auf seiner Unterstützungsfläche im Gleichgewicht sein muss, so muss jeder einzelne Körperteil auf dem ihn tragenden Gelenk im Gleichgewicht sein. Im Interesse einer möglichst kleinen Belastung sollte das Lot jedes Körperteilschwerpunkts inklusive von getragenen Gewichten genau über dem Gelenk bzw. ihm möglichst nahe sein, um die Beanspruchung zu reduzieren. Für die Stabilisierung kommen neben passiven Bändern, die durch eine Limitierung der Beweglichkeit stabilisierend wirken, seitliche aktive Muskeln hinzu. Knochen, Bänder und Gelenke stellen den passiven Bewegungsapparat dar. Zahlreiche Einzelmuskeln bewegen die Skelettelemente und stellen den aktiven Bewegungsapparat dar.

Das falsche Hantieren mit schweren Lasten, welches große mechanische Belastungen für den Körper mit sich bringt [Wirhed (1994)], sowie eine ständig falsch eingenommene Haltung, können Änderungen bzw. Erkrankungen an der Wirbelsäule bewirken. Das kommt insbesondere bei Menschen vor, die schwach ausgeprägte Muskeln besitzen. Diese richten die Wirbelsäule nicht so auf, dass sie wenig und vorwiegend axial belastet wird. Die Folge sind angespannte Muskeln und große Beanspruchungen auf Biegung, die zu Schmerzen und degenerierenden Erscheinungen in den Gelenken führen können.

## A. Basiswissen über die Statik der Wirbelsäule

### Die Wirbelsäule und ihre Funktion

Die Wirbelsäule besteht aus 33-34 knöchernen Segmenten (Wirbeln), die in geordneter Weise eines über dem anderen liegen. Die oberen 24 sind frei beweglich. Zwischen zwei frei beweglichen Wirbeln liegt eine Zwischenwirbelscheibe (Bandscheibe). Sie bildet eine Art Wasserkissen, das als Stoßdämpfer dient. Außerdem wird der Druck auf Grund des „hydraulischen Systems“ gleichmäßig auf ihre Gesamtfläche und damit auf den ganzen Wirbelquerschnitt verteilt. Unter Belastung werden die Bandscheiben ausgepresst, Flüssigkeit wird abgegeben und die Höhe der Bandscheibe nimmt etwas ab. Im entlasteten Zustand, z. B. in der Nacht, saugen die Bandscheiben Flüssigkeit auf und schwellen etwas an (Bild 4.1.3.1), am Morgen ist man daher etwas größer (das gleiche würde im All unter Schwerelosigkeit passieren). Die Wirbelsäule ist von vorn gesehen eine gerade Säule, in der Seitenansicht ist sie doppelt S-förmig (Bild 4.1.3.2). Ihre Hauptfunktion besteht darin, den aufrechten Oberkörper gegen die Schwerkraft zu halten, damit er nicht umfällt. Mit der Aufrichtung über das Becken trägt sie Kopf, Schultern und die oberen Gliedmaßen, den Brustkorb und das Abdomen (Unterleib) und überträgt deren Gewicht auf das Becken. Neben der Schutzfunktion für Rückenmark und

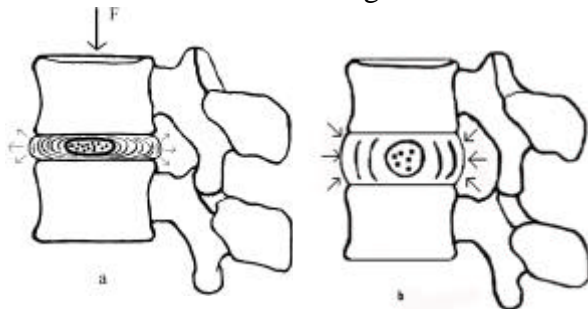


Bild 4.1.3.1: Unter Belastung (F) verliert die Bandscheibe Flüssigkeit und ihre Höhe wird kleiner (a). Bei Entlastung wird Flüssigkeit aufgenommen und die Höhe der Bandscheibe wird wieder größer (b).

Die Wirbelsäule besteht aus 33-34 knöchernen Segmenten (Wirbeln), die in geordneter Weise eines über dem anderen liegen. Die oberen 24 sind frei beweglich. Zwischen zwei frei beweglichen Wirbeln liegt eine Zwischenwirbelscheibe (Bandscheibe). Sie bildet eine Art Wasserkissen, das als Stoßdämpfer dient. Außerdem wird der Druck auf Grund des „hydraulischen Systems“ gleichmäßig auf ihre Gesamtfläche und damit auf den ganzen Wirbelquerschnitt verteilt. Unter Belastung werden die Bandscheiben ausgepresst, Flüssigkeit wird abgegeben und die Höhe der Bandscheibe nimmt etwas ab. Im entlasteten Zustand, z. B. in der Nacht, saugen die Bandscheiben Flüssigkeit auf und schwellen etwas an (Bild 4.1.3.1), am Morgen ist man daher etwas größer (das gleiche würde im All unter Schwerelosigkeit passieren).

Die Wirbelsäule ist von vorn gesehen eine gerade Säule, in der Seitenansicht ist sie doppelt S-förmig (Bild 4.1.3.2). Ihre Hauptfunktion besteht darin, den aufrechten Oberkörper gegen die Schwerkraft zu halten, damit er nicht umfällt. Mit der Aufrichtung über das Becken trägt sie Kopf, Schultern und die oberen Gliedmaßen, den Brustkorb und das Abdomen (Unterleib) und überträgt deren Gewicht auf das Becken. Neben der Schutzfunktion für Rückenmark und

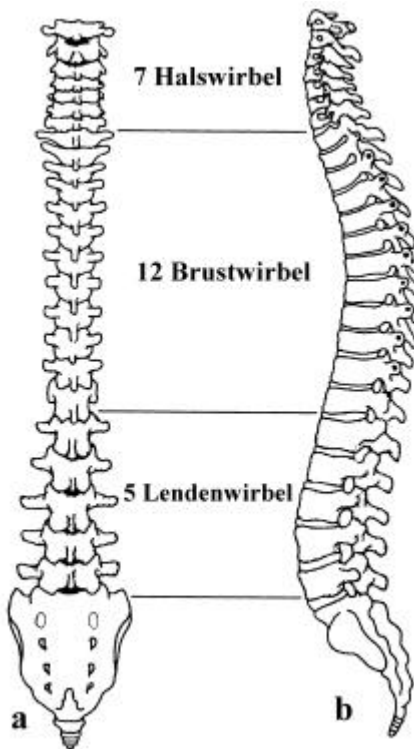


Bild 4.1.3.2: Wirbelsäule (a) von vorn und von der Seite (b) gesehen.

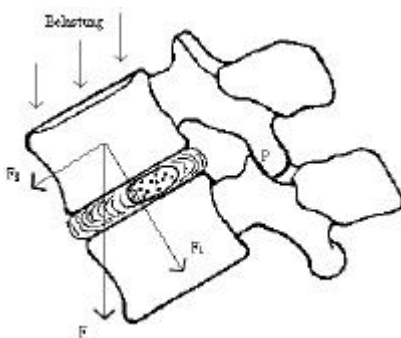


Bild 4.1.3.3: Die vertikale Belastung  $F$  produziert auf einer gebeugten Wirbelsäule, sowohl durch  $F_L$  eine axiale Komprimierung der Bandscheibe, als auch durch  $F_S$  eine Verschiebung des Wirbels nach vorn.

die zugehörigen Spinalnerven gibt die Wirbelsäule auch den inneren Organen bzw. Eingeweiden von Brust- und Bauchraum Halt.

Die Wirbelsäulenbiegungen dienen der zusätzlichen Stoßdämpfung bzw. Federung des Kopfes und Rumpfes, sie vergrößern die Flexibilität und bieten eine ausbalancierte Stabilität. Bei Fehlhaltungen kann die Wirbelsäule zu flach oder ihre Krümmungen zu stark ausgeprägt sein [Benedek (2000)].

Eine gerade Wirbelsäule ist relativ steif und die Stöße könnten bei wechselnder Belastung (beim Springen, Gehen usw.) zu hart sein. In einer zu stark gebogenen Wirbelsäule könnten in den Krümmungen starke Biegekräfte auftreten, die frühzeitig zu Schmerzen und Schäden wegen Überbeanspruchung führen könnten.

Zu hohe, sowie zu lang andauernde Belastungen und Überbeanspruchungen können auch Schäden der gesunden Strukturen verursachen. Wegen der enormen Flexibilität der Beanspruchungsgrenze (Anpassungs-Möglichkeiten) ist es schwierig zu sagen, was „zu hoch“ ist. Ein Beispielwert: Eine unbeschädigte Bandscheibe von Jugendlichen kann einem Druck der Größenordnung von  $10^3$  kPa standhalten [Betz (1998)].

Um die Wirkung einer Belastung besser zu verstehen, betrachten wir eine vertikale Belastung, wobei aber die Wirbelsäule nach vorne gebeugt ist (Bild 4.1.3.3).

Die Kraft  $F$  (Belastung) kann in zwei Komponenten zerlegt werden. Eine Längskomponente  $F_L$ , die den Wirbelkörper axial belastet und eine Schubkomponente  $F_S$ , die den Wirbelkörper vorwärts schiebt [Raubert (1978); Weineck (1984)]. Die Komponente  $F_L$  wird von der Bandscheibe, die Komponente  $F_S$  von Muskeln, Bändern und von der Gelenkfacette (P) aufgehoben, dabei kann eine Überbeanspruchung als extreme Folge zu einem Bruch führen.

Eine Überbeanspruchung hängt nicht nur von der gesamten Belastung ab, sondern auch von dem Druck auf eine einzige Stelle am Knochen oder in einem Gelenk, wobei eine Spannungsspitze die Elastizitätsgrenze des Gewebes überschreiten kann. Überbeanspruchungen können auch bei nicht gebeugter Wirbelsäule auftreten,

wenn die Bandscheiben zusammengepresst sind und die Belastung nicht gleichmäßig verteilt wird, sondern nur auf eine kleine Fläche wirkt, mit der Folge eines großen Druckes auf diese Fläche. Ausschlaggebend ist also auch die Verteilung der auftretenden Kräfte.

Bei der Wirbelsäule gibt es ein komplexes Muskelzugsystem, das mit den Zugleinen eines Schiffsmastes verglichen werden kann. In Bild 4.1.3.4 sind Bauchmuskeln ( $F_B$ ) und ihre Antagonisten, die Rückenmuskeln ( $F_R$ ), dargestellt. Ihr fein abgestimmtes Zusammenspiel garantiert eine aufrechte Haltung und Beweglichkeit des Oberkörpers.

Die Muskeln, die die Wirbelsäule aufrecht halten müssen, ziehen immer mit einer Komponente nach unten und üben damit auf die Wirbelsäule einen zusätzlichen Druck aus. Der Druck auf die Wirbelsäule ist daher nicht nur von dem darüberliegenden Körpergewicht und

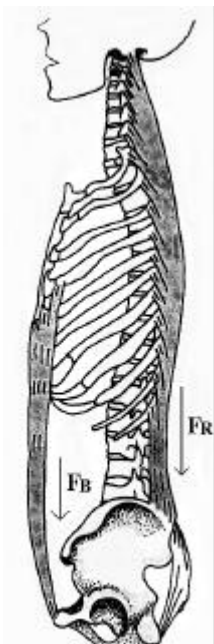


Bild 4.1.3.4:  
Rumpfmuskulatur.  
Die Pfeile  $F_B$  und  $F_R$  der von den Bauchmuskeln- und Rückenmuskeln ausgeübten Kräfte sind nicht maßstabsgerecht zueinander gezeichnet.

äußeren Belastungen gegeben, sondern auch von der Kraft die die Muskeln ausüben, um die Gewichtsmomente aufzuheben, damit ein Gleichgewicht vorliegt.

Die Bauchmuskeln sind häufig schwach, die Rückenmuskeln hingegen kräftig. Der Grund liegt darin, dass die Rückenmuskeln oft gegen die Schwerkraft arbeiten müssen und außerdem die Länge des Kraftarmes klein ist. Dieser Kraftarm ist der Abstand zwischen dem Drehpunkt (Zentrum der Lendenwirbel) und der Richtung des Muskelzugs und beträgt beim Menschen ungefähr 5 cm.

Beim Stehen verläuft das Schwerpunktlot des Oberkörpers nur wenige cm vor dem Zentrum der Lendenwirbelscheibe (Bild 4.1.3.5).

Die beiden Drehmomente, hervorgerufen durch die Gewichtskraft und die Rückenmuskeln, müssen sich im Gleichgewichtszustand kompensieren. Wenn wir annehmen, dass der Hebelarm des Gewichtes des Oberkörpers vom Zentrum der Wirbelscheibe 3 cm, der hintere Hebelarm der Rückenmuskeln 5 cm und die Gewichtskraft des Oberkörpers  $F_P$  400 N (m 40 kg) ist, ergibt sich aus  $400 \text{ N} \cdot 3 \text{ cm} = F_M \cdot 5 \text{ cm}$  für die von den Rückenmuskeln auszuübende Kraft 240 N. Die aus Körpergewicht und von den Muskeln ausgeübte resultierende Kraft (640 N) wirkt direkt auf die Bandscheibe bzw. das Gelenk und ist für ihre Beanspruchung maßgebend.

Die Kraft  $F_M$  haben wir in diesem und in anderen Beispielen als Summe aller von den Muskeln ausgeübten Kräfte bezeichnet, wohlverstanden aber, dass diese Substitution wegen der in verschiedene Richtungen wirkenden Kräfte, die auch unterschiedliche Angriffspunkte haben, eine Annäherung bzw. ein vereinfachtes Modell darstellt. Außerdem haben wir  $F_M$  als vertikal wirkend betrachtet, denn die kräftigeren Muskeln verlaufen parallel zur Wirbelsäule, die ja im Wesentlichen vertikal verläuft.

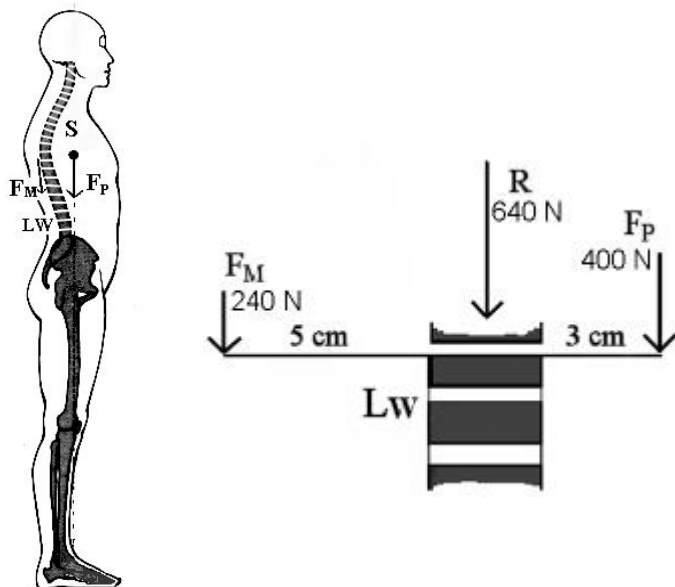


Bild 4.1.3.5: Beim Stehen verläuft das Lot des Schwerpunkts (S) des Oberkörpers nicht weit vor den Lendenwirbeln LW, das Gewichtsdrehmoment ist nicht groß und daher ist die Belastung klein. Die Schemazeichnung verdeutlicht die Verhältnisse (resultierende Kraft R (Belastung), Kraft  $F_M$  der Rückenmuskeln und Gewichtskraft  $F_P$ ).

### Belastung bei dickbäuchigen Menschen und bei schlechter Körperhaltung

Man spricht im Allgemeinen von einer guten Haltung, wenn der Rücken eine aufrechte und gestreckte Position einnimmt, aber gleichzeitig entspannt ist. In dieser Lage sind Bandscheiben, Muskeln, Sehnen und Bänder weitgehend entlastet und werden kaum beansprucht.

Viele Menschen haben jedoch eine schlechte Körperhaltung, die oft mit einer Schwerpunktverlagerung einher geht und eine zusätzliche Belastung für die Wirbelsäule und eine Mehrarbeit der aufrecht haltenden Muskulatur bedeutet.

Als Beispiel betrachten wir einen untrainierten und dickbäuchigen Menschen, bei dem die Bauchmuskeln völlig erschlafft sind und der schwere Bauch sich nach vorne schiebt. Der Schwerpunkt des oberen Körperteiles wird daher nach vorne verschoben und das Lot des Schwerpunktes S fällt weiter als normal vor die Wirbelsäulenbasis (Bild 4.1.3.6).

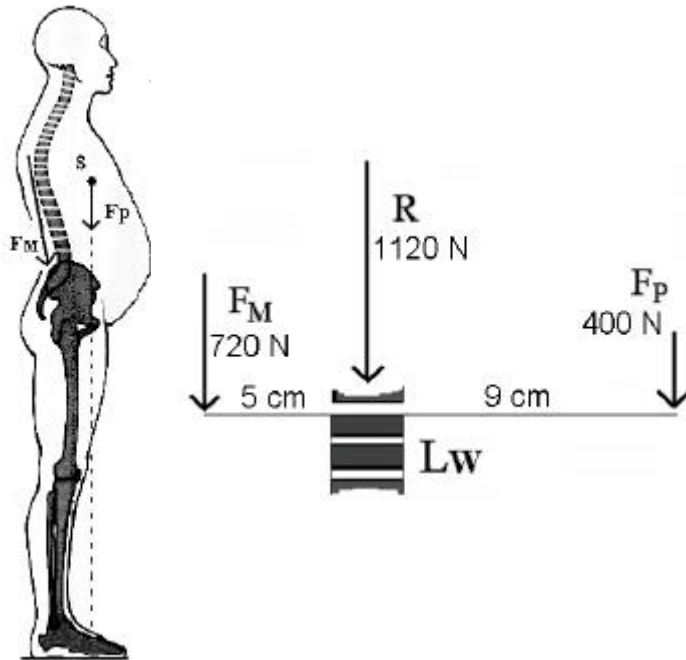


Bild 4.1.3.6: Bei einem dickbäuchigen Menschen oder auch bei einer Schwangeren fällt das Lot des Schwerpunktes S etwas weiter vor die Lendenwirbel LW als normal. Eine erhöhte Kraft  $F_M$  muss daher von den Rückenmuskeln ausgeübt werden, damit das wegen  $F_P$  wirkende Drehmoment aufgehoben wird. Daneben ist das zugehörige Kraftschema angegeben, wobei R die resultierende Kraft ist.

Es entsteht daher ein Drehmoment, das von den Rückenmuskeln kompensiert werden muss. Nehmen wir an, dass das Körpergewicht oberhalb der Lendenwirbelsäule 40 kg beträgt und die Lotlinie sich 9 cm vom Zentrum der Bandscheibe des unteren Lendenwirbels befindet. Wenn der Abstand zwischen Lendenwirbelsäule und Rückenmuskulatur 5 cm beträgt, gilt nach der Gleichung des Drehmomentengleichgewichtes:  $400 \text{ N} \cdot 9 \text{ cm} = F_M \cdot 5 \text{ cm}$ . Die Rückenmuskeln müssen deshalb eine Kraft  $F_M$  vom Betrag 720 N ausüben, um das wirkende Moment der Gewichtskraft des Körpers auszugleichen und den aufrechten Stand zu sichern. Die Belastung auf die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule von 1120 N ist durch die Summe beider Kräfte gegeben. Wie man sieht, ist diese Belastung doppelt so groß wie bei einem trainierten Menschen. Außerdem kommt bei untrainierten Menschen wenig Hilfe von der Bauchmuskulatur, die bei Anspannung den intraabdominalen Druck erhöhen und dem Rumpf helfen könnte, sich aufrecht zu halten.

Wenn der Körper nach hinten gebeugt wird um das Schwerpunktlot den Lendenwirbeln zu nähern, nimmt man eine anatomisch sehr unnatürliche Haltung ein.

### Belastung beim Sitzen

Im Allgemeinen geht beim spontanen Sitzen die S-Form der Wirbelsäule verloren. Gerades Sitzen ohne Rückenlehne ist bekanntermaßen ermüdend und führt nach einer gewissen Zeit zum Einsacken des Rumpfes. Beim Lesen und Schreiben ist die Blickrichtung von maßgeblicher Bedeutung für die Kopfstellung und damit für die Stellung und Krümmung des Rückens. Meist beugt man sich nach vorne über, was langfristig zu Kopfschmerz (Antiflexionskopfschmerzen) und Rücken-Nacken-Beschwerden führen kann.

Beim üblichen Sitzen verläuft die Lotlinie weit vor dem Lendenwirbel, während der Hebelarm des Rückenmuskels, wie beim Stehen, ungefähr 5 cm lang ist (Bild 4.1.3.7). Der Bandscheibeninnendruck bzw. die Belastung ist daher groß und abhängig von der Beugung nach vorne. Wenn wir annehmen, dass die Lotlinie im Abstand von 15 cm zur Lendenwirbelsäule



verläuft, ergibt sich aus der oben genannten Gleichung eine wirkende Kraft auf die Bandscheibe von 1,6 kN. Einige Autoren haben gemessen, dass die letzten Lendenwirbelscheiben beim Sitzen stärker beansprucht sind als beim Liegen oder Stehen. Sie fanden Druckwerte um 250 kPa im Liegen, 550 kPa im Stehen und 700 kPa im Sitzen [Schobert (1989)]. Beim Autofahren ist die Belastung durch die Stöße bei unebener Straße noch größer.

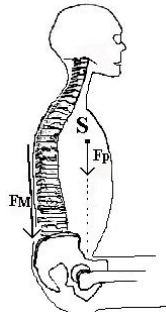


Bild 4.1.3.7: Beim freien Sitzen verläuft das Lot der Oberkörpergewichtskraft ( $F_p$ ) weit vor der Wirbelsäule, die Belastung ist damit groß und hängt von der Beugung nach vorne ab.  $S$  ist der Schwerpunkt des Oberkörpers und  $F_M$  die von den Muskeln zur Herstellung des Gleichgewichtes ausübende Kraft.

### Belastung beim Heben

Die Beanspruchung der Wirbelsäule beim Hantieren mit Lasten hängt von der Masse und gegebenenfalls von der Beschleunigung der bewegten Last, von der Körperhaltung und von der Dauer der Belastung ab [Hartmann (1996); Hobbs (1991)]. Bei beidhändigem, symmetrischem Halten von Lasten kann man zur Berechnung von Drehmomenten und Kräften ein zweidimensionales Modell verwenden (Bild 4.1.3.8). Die Summe aller Drehmomente von allen Körperteilen und gehaltenem Gewicht ist gleich dem Drehmoment der gesamten Gewichtsmasse, konzentriert im Schwerpunkt.

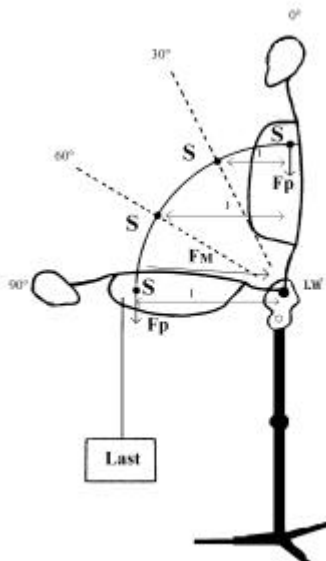


Bild 4.1.3.8: Modell zur Bestimmung der Belastung der Wirbelsäule beim Halten einer Last in verschiedenen Lagen, wobei  $S$  der Schwerpunkt des gesamten Systems,  $F_p$  das gesamte Gewicht (Oberkörper + Last),  $F_M$  die Rückenmuskelkraft,  $l$  der Hebelarm und LW die Lendenwirbeln sind. Auf Grund der großen Masse des Ständers fällt das Modell nicht um.

Wenn der gesamte Schwerpunkt des Oberkörpers und der Last genau über der Wirbelbasis liegt, d.h. die Wirbelsäule etwa vertikal ist, dann ist das Drehmoment null. Die axiale Belastung in der unteren Wirbelsäule ist dann nur  $F_p$  und zwar die Gewichtskraft vom Oberkörper z. B. 400 N (m 40 kg) und die Gewichtskraft der Last von z. B. 500 N (m 50 kg), insgesamt also 900 N. Von vertikaler zu horizontaler Lage wird die Länge ( $l$ ) des Hebelarmes größer, mit einem Maximum bei 90°. In dieser Lage, wenn wir für die Länge des Hebelarmes des Schwerpunkts von den Lendenwirbeln 30 cm annehmen, entsteht ein Drehmoment von 900 N · 30 cm. Wenn der Hebelarm der Rückenmuskeln 5 cm ist, muss für das Gleichgewicht die von der Rückenmuskulatur ausbalancierende Kraft  $F_M$  gleich 5400 N sein. Die Belastung in den Wirbeln hat in diesem Fall sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Komponente. Wenn wir annehmen, dass die Muskelkraft horizontal zieht, so ist die Belastung in horizontaler Richtung 5400 N und in vertikaler 900 N. Die Belastung erzeugt i. Allg. sowohl eine Kompressionskraft, hauptsächlich von der Rückenmuskulatur kommend (infolge ihres annähernd parallelen Verlaufes zur Wirbelsäule), als auch eine Scherkraft, die durch einen Teil der Gewichtskraft gegeben ist. Die Verteilung beider Kräfte hängt von der Orientierung der Wirbelsäule ab.

Im Bild 4.1.3.9 sind die Kompressionskräfte (Belastungen) auf die Lendenwirbelscheibe beim Halten von Lasten in unterschiedlichen Körper- und Armhaltungen dargestellt. Der Hebelarm des Oberkörpers bzw. der Last ist entscheidend für die Belastung, wobei diese Hebelarme auf Grund der nicht immer vertikal gehaltenen Arme und Beine bei 90° Rumpfneigung keine maximale Länge haben.

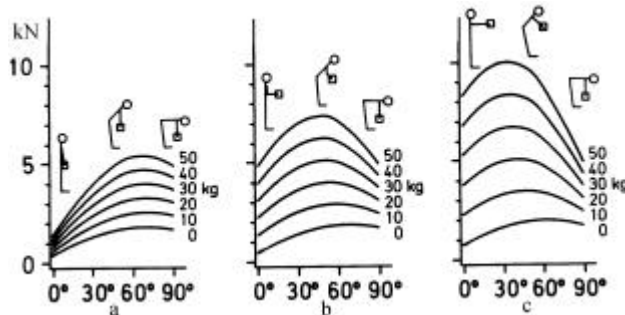


Bild 4.1.3.9a-c: Belastung auf die Lendenwirbelsäule einer Person von 70 kg, beim Halten von Lasten in unterschiedlicher Körper- und Armhaltung [aus Jäger (1990)]. Auf der x-Achse ist der Winkel zwischen Wirbelsäule und der Vertikalen aufgetragen.

### Belastung bei symmetrischen und asymmetrischen Lasten

Wenn eine Last symmetrisch verteilt ist, indem sie über die Schultern oder mit beiden Händen getragen wird, ist die Belastung der Wirbelsäule wesentlich geringer als beim einseitigen Tragen. In Bild 4.1.3.10a ist die Wirbelsäule vertikal mit 700 N belastet, wobei 15 kg (150 N) links + 15 kg (150 N) rechts getragen werden und das Oberkörpergewicht 40 kg (400 N) beträgt. Es entsteht in diesem Fall kein Drehmoment von den getragenen Gewichten und die Rückenmuskeln müssen kaum eine Kraft ausüben, um ein Gleichgewicht herzustellen.

Bei einem asymmetrischen Tragen (Bild 4.1.3.10b) wird ein Drehmoment von der gesamten Gewichtskraft  $F_P$  (von Oberkörper + Last) erzeugt, das von der Kraft  $F_M$  kompensiert werden muss. Die Belastung hängt daher auch von dem Hebelarm des gesamten Schwerpunkts ab. In diesem Fall wird der Oberkörper normalerweise zur Seite gebeugt, um den Hebelarm zu reduzieren. Wenn wir annehmen, dass der Hebelarm des gesamten Schwerpunktes 10 cm von der Lendenwirbelsäule und der Hebelarm der Rückenmuskeln für das Zur-Seite-Beugen 5 cm ist, muss für das Gleichgewicht  $F_M \cdot 5 \text{ cm} = 700 \text{ N} \cdot 10 \text{ cm}$  sein und die nötige Kraft  $F_M$  ist 1400 N. Die Belastung, die von beiden Kräften gegeben ist, beträgt 2,1 kN. Durch Beugen zur Seite kann man immer erreichen, dass das Lot des Schwerpunktes durch die Lendenwirbelsäule geht. Allerdings muss dann die Wirbelsäule stark gekrümmt werden, was mit einer hohen Belastung der gesamten Wirbelsäule verbunden ist.

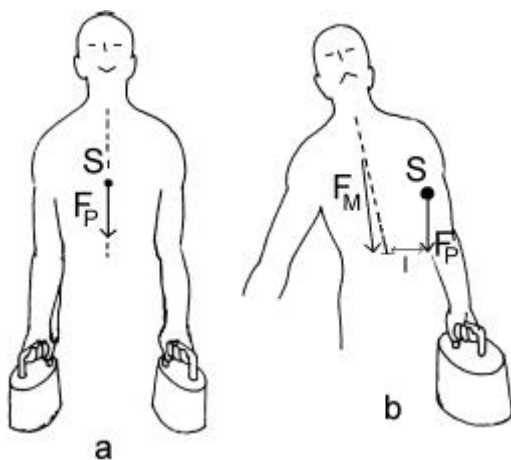


Bild 4.1.3.10: Belastung mit einer symmetrisch (a) bzw. asymmetrisch (b) verteilten Last, wobei die zusätzliche Muskelkraft  $F_M$  aufgebracht werden muss, um ein Gleichgewicht zu haben. S ist der Gesamtschwerpunkt (Oberkörper + Last),  $F_P$  das gesamte Gewicht (Oberkörper + Last) und  $l$  der Hebelarm.

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einleitung

Die Lehrkraft informiert die Schülerinnen und Schüler über folgendes:

Im Laufe der Evolution musste der Mensch, vor allem in der Zeit als er sich zum aufrecht gehenden Wesen entwickelte, Veränderungen durchmachen, um sich immer wieder neuen Situationen anzupassen. Die ausschließliche Nutzung der unteren Extremitäten als Träger- und Fortbewegungsorgane des Körpers befreite die Arme von diesen Funktionen. Parallel zu dieser Entwicklung erhebt sich der Rumpf über den unteren Gliedmaßen und wird zum Träger des Kopfes und der oberen Gliedmaßen. Diese Aufrichtung bedeutet wegen der Schwerkraft eine erhöhte mechanische Beanspruchung der Wirbelsäule, die als zentrale Achse den Oberkörper in Zusammenarbeit mit Muskeln und Nerven senkrecht halten muss. Außerdem muss der Rücken alle Lasten, die wir heben oder stemmen, tragen.

Das falsche Hantieren mit schweren Lasten, einförmige Bewegungsabläufe, starre Haltungen, lang andauerndes Sitzen bei zunehmend forderndem Arbeitstempo, Ganzkörperschwingungen, das Laufen auf asphaltierten Straßen usw. belasten die Wirbelsäule.

### 2. Übungen zur Lage des Schwerpunkts

Die übliche Behandlung des stabilen Gleichgewichts kann durch die folgenden Beispiele für das Gleichgewicht bei Menschen ergänzt werden.

Intuitiv ist den SchülerInnen klar, dass der Schwerpunkt bei gerader Haltung im Körperinneren etwa auf Nabelhöhe liegt. Bei geneigtem Körper verschiebt sich der Schwerpunkt je nach Körperhaltung: der Lehrer kann durch Folien verschiedene Körperhaltung präsentieren (Bild 4.1.3.11). Dabei sollen die Schüler zeigen, wohin sich der Schwerpunkt (B) durch Änderung der Körperhaltung verschiebt.

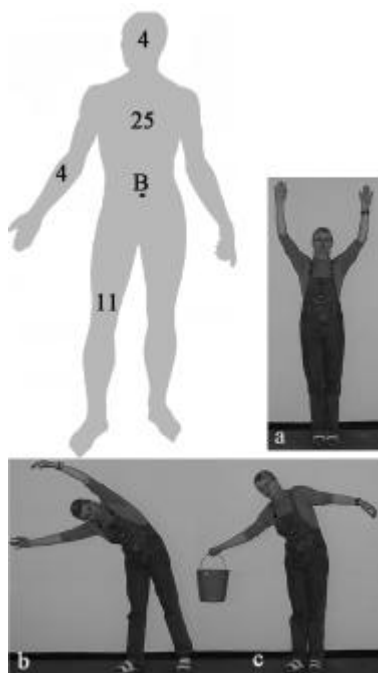


Bild 4.1.3.11: Folien für die Lage des Schwerpunktes bei verschiedenen Haltungen. Auf dem größeren Körperbild sind die Teilkörpergewichte in kg angegeben.

Im größeren Bild sind die ungefähren Körperteilmassen gegeben: Kopf (4 kg); Rumpf (25 kg); Arm (4 kg); Bein (11 kg).

Dies kann mit einer Dreipunktwaage überprüft werden. Z.B. kann ein größeres, dreieckiges Brett auf drei Personenwaagen gelegt werden. Man muss seine Füße auf dem Brett nach Anweisung so verschieben, dass alle drei Waagen den gleichen Wert anzeigen. Die Schwerpunktlinie fällt dann in die Brettmitte.

### 3. Bedingung für stabiles Stehen

Bei einem Körper in aufrechter Position ist das Gleichgewicht stabil, wenn das Lot vom Körperschwerpunkt aus innerhalb der Standfläche liegt (Bild 4.1.3.12). Fällt die Schwerpunktlinie in die Begrenzung der Standfläche, dann besteht ein labiles Gleichgewicht, wobei die geringste horizontal angreifende Kraft den Körper zum Umfallen bringt. Auch die Schülerinnen und Schüler können dies ausprobieren, indem sie sich mit gestrecktem Körper solange nach vorne neigen, bis sie, wenn die Schwerpunktlinie außerhalb der Standfläche den Boden berührt, umfallen.

Man kann den Schülern die Situationen in Bild 4.1.3.13a vorführen bzw. die Abbildungen auf Folie zeigen um ihnen zu verdeutlichen, dass der Körper beim einseitigen Tragen eines schweren Gewichtes zur Gegenseite verschoben wird, damit das Lot des Gesamtschwerpunktes (Körper + Gewicht) noch in die Standfläche hinein fällt.

Die Standfläche und damit die Stabilität kann entweder durch Auseinanderstellen der Füße oder mit einer Gehhilfe (z. B. eines Stockes) vergrößert werden (Bild 4.1.3.13b).

In den folgenden Schritten wird die Beanspruchung der Wirbelsäule bzw. der sie stabilisierenden Muskeln thematisiert.



Bild 4.1.3.12: Trifft das Lot des Schwerpunktes an den Stellen 1 und 2 auf dem Boden auf, ist das Gleichgewicht stabil, bei 4 fällt die Person um, bei 3 liegt ein instabiles Gleichgewicht vor.

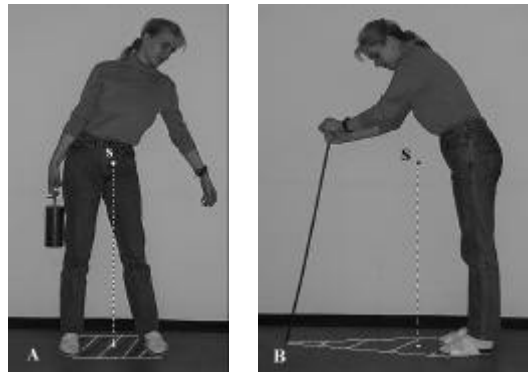


Bild 4.1.3.13: (a) Beim Tragen eines Gewichtes wird der Körper zur Gegenseite verschoben, damit das Lot des Gesamtschwerpunktes S (Körper und Gewicht) in die Standfläche hinein fällt. (b) Vergrößerung der Standfläche durch einen Stock.

#### 4. Aufbau der Wirbelsäule und Muskulatur

Anhand von Folien werden zunächst der Aufbau der Wirbelsäule und die Rumpfmuskulatur und ihre stabilisierende Funktion erläutert. Weiterhin wird mitgeteilt, dass beim Stehen normalgewichtiger Personen mit guter Körperhaltung das Lot des Schwerpunktes nur wenige cm an dem Zentrum der Lendenwirbelscheibe vorbeiläuft.

#### 5. Die Belastung der Rückenmuskulatur bei unterschiedlicher Lage des Schwerpunkts

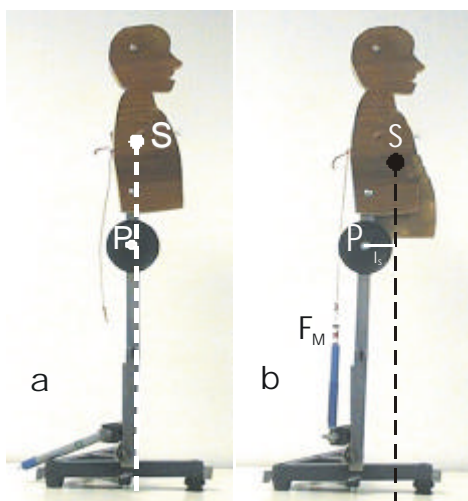


Bild 4.1.3.14: Eine normale, aufrechte Haltung (a) braucht keine Zugkraft durch die Rückenmuskeln. (b) stellt einen rundlichen Menschen dar, wobei eine kompensierende Kraft ( $F_M$ ) durch die Rückenmuskeln erforderlich wird.

Anhand der Schemazeichnungen und Beispielgrößen auf einem Arbeitsblatt oder durch Folien wird die deutlich größere Belastung für eine dickbäuchige Person ermittelt. Dieses theoretische Ergebnis kann durch das folgende Modell anschaulich bestätigt werden:

In Bild 4.1.3.14a ist ein Modell eines Menschen dargestellt, das aus einem Holzbrett ausgesägt wurde, wobei das Schwerpunktlot des Oberkörpers etwa auf den Drehpunkt fällt. Mit Hilfe dieses Modells kann man zeigen, dass praktisch keine Zugkraft notwendig ist, um die aufrechte Haltung beizubehalten und keine schräge Spannung entsteht. Bei einem realen Körper in dieser Lage brauchen die Rückenmuskeln also kaum Kräfte auszuüben, um das Gleichgewicht zu halten.

Wenn wie in Bild 4.1.3.14b ein Teil des Modellrumpfes nach vorne verschoben wird (Verschiebung des



Schwerpunkts - Vergrößern des Hebelarms), so als ob das Modell einen großen Bauch hätte, braucht man eine Kraft  $F_M$  um wieder eine aufrechte Haltung herzustellen. Diese Kraft muss bei einem dicken Menschen permanent von den Rückenmuskeln ausgeübt werden, was eine erhebliche Dauerbelastung für die Muskulatur und die Wirbelsäule darstellt. Es folgen die in Abbildungen 4.1.3.5 und 4.1.3.6 dargestellten Anwendungen des Hebelgesetzes.

Die Schüler werden feststellen, dass, je weiter der Schwerpunkt  $S$  eines Körperteiles (in diesem Fall des Oberkörpers) vom Drehzentrum  $P$  entfernt verläuft, um so größer ist die von den Rückenmuskeln auszuübende Kraft.

### 6. Belastungen beim Heben eines Gewichtes

In Bild 4.1.3.15a bzw. 4.1.3.15b wird mit Hilfe des Modells die Belastung beim Heben mit hängenden Armen und geraden bzw. gebeugten Beinen gezeigt. Die Schüler erkennen, dass mit gebeugtem Rücken und gestreckten Beinen der Hebelarm  $l$  des Oberkörpers bzw. der Last länger als mit geradem Rücken und gebeugten Knien ist. Die kompensierende Kraft, die von den gesamten Rückenmuskeln ausgeübt wird, muss im ersten Fall groß sein und daher wird auch die Belastung der Wirbelsäule sehr hoch.

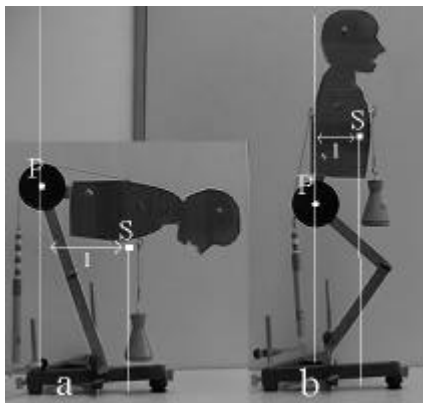


Bild 4.1.3.15: Falsches Heben mit gebeugtem Rücken und gestreckten Beinen (a), richtiges Heben mit geradem Rücken und gebeugten Knien (b).

### 7. Gute und schlechte Körperhaltungen

Durch die Diskussion der folgenden Abbildungen können die SchülerInnen die unterschiedliche Belastung der Wirbelsäule in Abhängigkeit von der Haltung bzw. Bewegung erkennen. Die Schüler sollen die Körperhaltungen in einer Auswahl der Bilder 4.1.3.16 qualitativ vergleichen und in gute (geringe Belastung der Wirbelsäule) und schlechte (große Belastung der Wirbelsäule) Haltungen sortieren und ihre Wahl begründen. Sie können auch auf diesen Bildern die Wirbelsäule einzeichnen, die Lage der Schwerpunkte der oberen Körperhälften schätzen und die Hebelarme abmessen (siehe Bild 4.1.3.16a), wobei die Länge  $l$  30 cm und  $F_P$  (Oberkörper + Last) 450 N ist. Dann können sie die Belastungen in einigen Körperhaltungen abschätzen und zwar unter den Bedingungen, dass die Frau 1,75 m groß ist und ihre Körpermasse 60 kg beträgt.

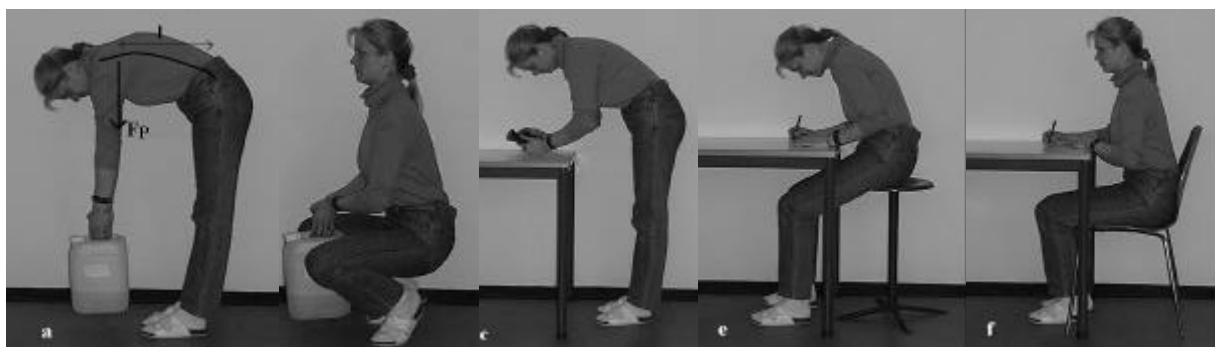


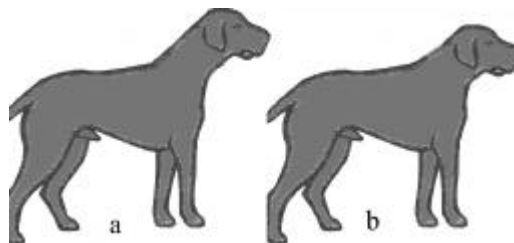
Bild 4.1.3.16: Beispiele für gute und schlechte Körperhaltungen

Die folgenden Fragen dienen zur Wiederholung:

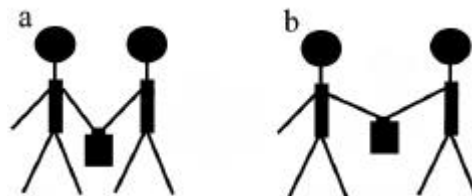
- 1) Bei welchem Bild ist der Schwerpunkt (weißes Quadrat) falsch angezeigt?



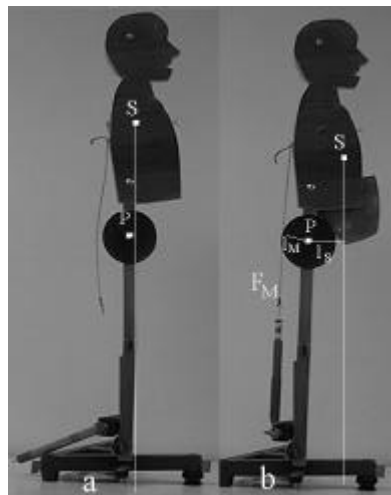
- 2) Welcher Hund wird wahrscheinlich mehr Probleme mit den Halswirbeln haben, wenn in beiden Fällen die Muskeln- bzw. die Knochenstärken gleich sind?



- 3) Wenden die beiden Kinder beim Halten einer Tasche in a) und b) die gleiche Kraft auf? Begründe Deine Antwort.



- 4) Welche Kraft  $F_M$  muss im Bild b) von der Feder ausgeübt werden, wenn wir für den Oberkörper des Modells eine Masse von 5 kg und für die Abstände  $l_M$  bzw.  $l_S$  Werte von 5 cm bzw. 6 cm annehmen?



- 5) Du hältst zunächst einen Gegenstand von 2 kg Masse 10 cm von dem Körper entfernt (der Abstand zur Wirbelsäule ist dann 20 cm) und dann einen Gegenstand von 1 kg Masse 50 cm von dem Körper entfernt. In welchem Fall müssen die Rückenmuskeln eine größere Kraft ausüben?

### Antworten

- 1) Das Lot des Schwerpunkts soll, damit eine aufrechte Haltung möglich ist, auf die Standfläche fallen. Daher ist in b der Schwerpunkt falsch angezeigt.
- 2) Der Hund in a, weil sein Kopf wegen des längeren Halses ein größeres Drehmoment erzeugt. (Dies ist z. B. beim Dobermann der Fall.)
- 3) Je größer der Abstand zwischen den beiden Kindern ist, desto größer müssen die einzusetzenden Kräfte sein, weil die horizontale Kraftkomponente, die keine Wirkung auf das Halten haben, bei zunehmendem Abstand größer wird.
- 4) Die Kraft  $F_M$  ist durch die Gleichung  $F_M \cdot 5 \text{ cm} = (5 \cdot 9,8) \text{ N} \cdot 6 \text{ cm}$  gegeben. Diese ergibt  $F_M = 59 \text{ N}$ .
- 5) Die 20 cm vor der Wirbelsäule gehaltene Masse von 2 kg wirkt mit einem Drehmoment  $(2 \cdot 9,8) \text{ N} \cdot 20 \text{ cm}$ . Die Masse von 1 kg würde mit einem größeren Drehmoment und zwar mit  $(1 \cdot 9,8) \text{ N} \cdot (50 + 10) \text{ cm}$  wirken. Die ausgleichende Muskelkraft muss daher größer sein.

## 4.2 Der Blutkreislauf<sup>1</sup>

Der Blutkreislauf erfüllt im menschlichen Körper wichtige Aufgaben, die den meisten Schülern schon aus dem Fach Biologie bekannt sind. Sinnvoll erscheint daher eine ergänzende Behandlung dieses Stoffes unter physikalischen Gesichtspunkten als fachübergreifender und lebensbezogener Unterricht.

Man kann z.B. neben statischen Betrachtungen Störungen im Blutkreislauf betrachten, einerseits weil sie lebensbedrohende Krankheiten hervorrufen können, über die sicherlich viele Schüler mehr erfahren wollen; Andererseits kann das Zustandekommen dieser Krankheiten meistens gut physikalisch erklärt werden und zwar anhand von Gesetzen der Hydrostatik und Hydrodynamik, die somit gut in den Unterricht eingebaut werden können.

Die Schülerinnen und Schüler lernen im Verlauf der Unterrichtseinheit:

- wie Druck gemessen werden kann und wie die SI-Einheit des Druckes lautet;
- dass das Fließen einer Flüssigkeit von gewissen Eigenschaften der Flüssigkeit, der Druckdifferenz und dem Leitungswiderstand abhängt;
- dass der Rohrdurchmesser eine große Rolle für den Leitungswiderstand spielt;
- dass bei Verengungen und Erweiterungen eines Rohres Druckänderungen entstehen;
- die Bernoulli Gleichung anzuwenden;
- die Laplace-Gleichung;
- Funktion und Ablauf des Blutkreislaufs von einem physikalischen Gesichtspunkt aus zu betrachten.

### Basiswissen über Blut und Kreislauf

#### Das Blut

Das Blut besteht aus einer wässrigen Lösung (Plasma), in der feste Bestandteile (Blutzellen) aufgeschwemmt sind. Jeder  $\text{mm}^3$  Blut enthält:

- 4-6 Millionen scheibenartige rote Blutkörperchen (Erythrozyten), die eine Größe von ca.  $7\mu\text{m}$  und eine Dicke von ca.  $2\mu\text{m}$  haben. Ihre rote Farbe ist durch den im Zellinneren eingeschlossenen roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) bedingt, an den Sauerstoff chemisch gebunden wird.
- 4-9 Tausend weiße Blutzellen (Leukozyten)
- 150-350 Tausend Blutplättchen (Trombozyten)

#### Blutkreislauf

Der Transport von Stoffen und Gasen kann im Gewebe über kurze Strecken (bis etwa 1 mm) durch Diffusion der Moleküle stattfinden. Für weitere Strecken ist ein strömendes Medium erforderlich, das alle Bedarfsstoffe enthält und zugleich auch alle Abfallstoffe aufnimmt. Außerdem ist ein Transportsystem erforderlich, welches das Medium zu allen Orten befördert.

Im menschlichen Organismus ist das strömende Medium das Blut und das Transportnetz ist durch das Gefäßsystem gegeben. Zusammen mit dem Herz als Antrieb bildet es das Herzkreislauf-System, das die zentrale Aufgabe hat, jede einzelne Zelle des Organismus zu versorgen und Stoffwechselprodukte zu entsorgen:

Sauerstoffarmes Blut wird von der rechten Herzhälfte durch die Lungenarterien in die Lungen gepumpt. Nach Abgabe von Kohlendioxid und Aufnahme von Sauerstoff fließt das Blut über

---

<sup>1</sup> Teile der Einheiten wurden bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (1999a); Colicchia u.a. (2000f)].

die Lungenvenen in die linke Herzseite, die es in die Arterien ausstößt. Die Arterien verästeln sich feiner bis in die Haargefäße (Kapillaren), bringen den Sauerstoff und andere Substanzen an die Zellen des ganzen Gewebes heran und sorgen für den Abtransport der Kohlensäure und der Stoffwechselprodukte. Die Haargefäße sammeln sich zunächst in kleinen Venen, die dann in größere Venen münden und das verbrauchte Blut zum Herzen zurückleiten. Dann beginnt der Zyklus von vorne.

Der Blutkreislauf besteht also aus zwei aufeinanderfolgenden Kreisläufen: dem großen Körperkreislauf, der von der linken Herzhälfte angetrieben wird und dem kleinen Herz-Lunge Kreislauf, der von der rechten Herzhälfte in Gang gehalten wird.

Das Blutgefäßsystem umfasst einige wenige Arterien und Venen, von denen die größten einen Durchmesser von bis zu 2 cm haben, und Millionen von Kapillaren, von denen die kleinsten einen Durchmesser von einigen Mikrometern haben. In diesem Netz können die Gefäße parallel oder aufeinanderfolgend verlaufen. Das Blut fließt auf Grund eines Druckgefälles, das im Gefäßnetz herrscht.

### Blutdruck in den Arterien

Während der Systole (Kontraktion der linken Herzkammer) wird das Blut in die Arterien gepumpt, der Blutdruck des Körperkreislaufes erreicht dabei ein Maximum, das normalerweise bei einem jungen Menschen bei 16 kPa liegt. In der Diastole (Erschlaffungsphase des Herzmuskels) wird vom Herzen kein Blut gepumpt, aber der Blutdruck verschwindet nicht ganz, weil sich die Arterien während der Systole erweitert haben und sich dann wieder zusammenziehen. Es bleibt immer ein minimaler Druck (11 kPa) bestehen (Windkesselfunktion der Aorta).

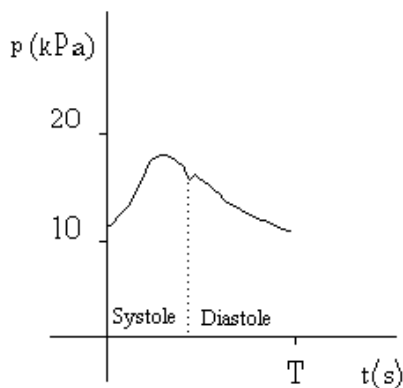


Bild 4.2.1: Blutdruckwerte ( $p$ ) in einer großen Arterie während eines Herzzyklus ( $T$ ).  $T$  ist ca. 1 s. (Der Einschnitt zwischen Systole und Diastole ist das Ergebnis eines kurzen Rückstroms am Ende der Systole.)

Der mittlere Blutdruck ist gewöhnlich kleiner als das arithmetische Mittel aus dem systolischen und diastolischen Blutdruckwert, weil die diastolische Phase länger dauert als die systolische (Bild 4.2.1). Im Durchschnitt beträgt der mittlere Druck ca. 13 kPa.

Eine Erhöhung des Schlagvolumens sowie eine reduzierte Dehnbarkeit hat meistens einen höheren systolischen Blutdruck zur Folge, ein größerer peripherer Widerstand führt überwiegend zu einer Steigerung des diastolischen Blutdruckes.

Verschiedene Faktoren können den Blutdruck beeinflussen. Psychische Anspannung (z. B. Aufregung vor einer Prüfung) oder äußere Reize (z. B. Kälte, Wärme), sowie körperliche Arbeit können akute Blutdruckanstiege bewirken.

Man findet auch eine deutliche Abhängigkeit des Blutdrucks vom Alter, wobei die Steigerungsursache noch weitgehend ungeklärt ist [Thews (1997)].

### Kontinuitätsgleichung und Strömungsgeschwindigkeit

Ohne Quelle und Senke ist der Volumenstrom bei einer inkompressiblen Flüssigkeit durch jeden Schnitt durch den Flüssigkeitsstrom gleich groß. Es ist  $I_v = \bar{v} \cdot A = \text{konstant}$  (Kontinuitätsgleichung), wobei  $\bar{v}$  die mittlere Geschwindigkeit der Flüssigkeit und  $A$  die Querschnittsfläche ist.

Das Herzminutenvolumen ist bei einem Menschen in Ruhe ca. 5 l/min und die Momentangeschwindigkeit des Blutes am Eingang der Aorta kann bis zu  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  betragen. Bei maximaler

Leistung steigt der Pulsschlag. Das Herzminutenvolumen erreicht Werte bis zu 20 l/min mit momentanen Blutgeschwindigkeiten von bis zu  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

Je mehr sich die Arterien verzweigen, desto größer wird die gesamte Querschnittsfläche (A), während die Volumenstromstärke ( $I_v$ ) konstant bleibt. Deshalb verringert sich gemäß der Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit, die durch  $I_v/A$  gegeben ist (Bild 4.2.2). So wird die Strömungsgeschwindigkeit in den parallelen Kapillaren, deren gesamte Querschnittsfläche fast 1000 Mal größer als die der Aorta ist, in der Größenordnung von  $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$  sein.

### Druckabfall in den Gefäßen

Durch innere Reibung im Blut und an der Gefäßwand findet ein Druckabfall beim Abfließen des Blutes statt und der Blutdruck wird in den Blutbahnen allmählich geringer, je weiter das Blut vom Herzen wegfließt (Bild 4.2.2). Der Druckabfall lässt sich näherungsweise durch  $\Delta p = (8 \eta L / \pi r^4) \cdot I_v$  (Hagen-Poiseuille Gleichung) beschreiben, wobei  $\eta$  die Viskosität,  $I_v$  die Volumenstromstärke, L die Länge und r der Radius eines Rohres sind. Die Gleichung, die vergleichbar mit der Beziehung  $U = R \cdot I$  für elektrische Stromkreise ist, gilt nur wenn die

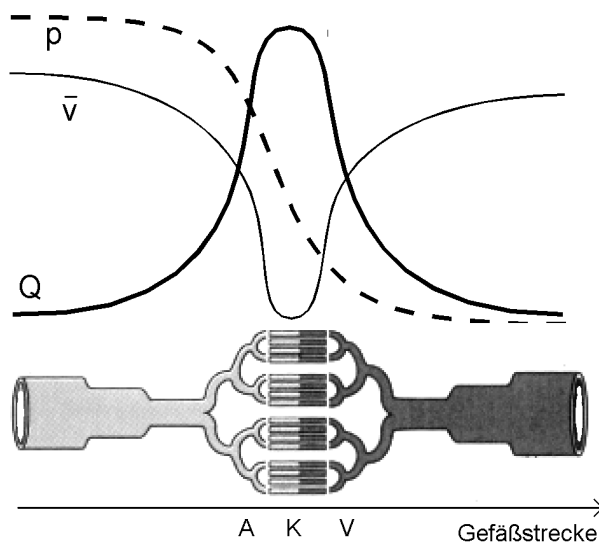


Bild 4.2.2: Darstellung des mittleren Blutdrucks (p), der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ( $\bar{v}$ ) und der Gesamtquerschnittsfläche (Q) der Strombahnen in einer Arterie (bis A), durch eine Kapillare (K) und in einer Vene (ab V).

[Nach verschiedenen Autoren.]

Strömung laminar ist. Bei turbulenten Strömungen wird der Strömungswiderstand größer. Voraussetzungen für die Anwendung der Hagen-Poiseuille-Gleichung ist außerdem die Starrheit des Rohres, die Homogenität der Flüssigkeit und eine von Scherkräften unabhängige Viskosität, die beim Blutsystem nicht erfüllt sind. Deswegen lässt sich die Blutströmung im Gefäßsystem nur näherungsweise durch diese Gleichung beschreiben. Erklären lässt sich damit die starke Zunahme des Strömungswiderstandes in den Kapillaren.

Der Blutdruck sinkt wegen der Abhängigkeit von r zur vierten Potenz im Bereich der engen Arterien (Arteriolen), Kapillaren oder Verengungen stark ab. Deswegen haben schon kleinste Veränderungen des Radius an Blutgefäßen (Vasodilatation oder Vasokonstriktion) große Auswirkung auf den Strömungswiderstand bzw. auf die Durchblutung.

### Messung des Blutdrucks

Die gängigste Methode der Blutdruckmessung ist die Manschettenmethode. Dabei wird der Blutdruck in der Armbeuge (A. Brachialis) gemessen. Man wählt diese Arterie, weil sie relativ nahe an der Oberfläche und außerdem in Herzhöhe liegt und in ihr daher etwa derselbe Blutdruck wie in der Aorta herrscht.

Der Arzt bläst die Manschette auf, bis der Druck in der Manschette größer ist als der Arteriendruck. Die Arterie wird zusammengepresst und der Blutfluss unterbunden. Dann vermindert der Arzt langsam den Druck in der Manschette. Wenn der angelegte Druck den systolischen Druck erreicht, beginnt Blut durch diese Arterie zu fließen. Dies geschieht mit turbulenter Strömung. Die durch Verwirbelung des Blutes entstehenden Geräusche kann man mit

dem Stethoskop, dessen Bruststück man in der Armbeuge unmittelbar nach der Manschette aufgesetzt hat, hören (systolische Druck). Man senkt den Druck in der Manschette weiter bis der diastolische Druck erreicht wird. Das ist dann der Fall, wenn man kein Geräusch mehr hört, weil der Blutstrom nun ungehindert d. h. laminar fließen kann.

In den modernen Blutdruckmessgeräten wird ebenfalls eine Manschette angelegt, der Druck jedoch elektronisch gemessen. Das pulsierende Geräusch des Blutstroms (Korotkoff-Töne) wird über ein Mikrophon aufgenommen. Beim Auftreten der ersten Töne wird der zu diesem Zeitpunkt gemessene Blutdruck automatisch in einem Display angezeigt. Ebenso wird auch derjenige Blutdruck angezeigt, der vorliegt, wenn das pulsierende Geräusch verschwindet.

Diese Methode kann nur bei einer Arterie angewendet werden, die relativ nahe an der Oberfläche liegt. Für tiefe Arterien, die sich nicht zusammenpressen lassen, sowie für Arteriolen und Venen ist diese Methode auf Grund der niedrigeren Fließgeschwindigkeit des Blutes, nicht anwendbar. Im Hinblick auf die Thematisierung im Unterricht ist der sogenannte „blutige“ Blutdruckmesser geeigneter. Dieser besteht aus einer Kanüle, die man in die Blutgefäße einführt, und aus einem an die Kanüle angeschlossenen Messschlauch, der senkrecht gehalten wird, um das Niveau ablesen zu können, das vom jeweiligen Blutdruck erreicht wird.

## 4.2.1 Schweredruck

Während der Evolution haben sich die Lebewesen daran angepasst, dass sich der Schweredruck in einer senkrechten Blutsäule mit der Höhe ändert. Daher ist das Herz-Kreislaufsystem von Tieren, die sich aufrichten oder sich aufwärts bewegen können, anders als bei Tieren, die sich immer in horizontaler Lage befinden. Man findet z. B., dass bei einer Baumschlange das Herz näher beim Kopf liegt und der Blutdruck höher ist, um das Gehirn gut zu durchbluten. Außerdem ist der Körper dieser Schlange dünn und die Haut fest, um einen Blutstau im Schwanz möglichst zu vermeiden. Bei einer nicht-kletternden, landlebenden Schlange würde das Blut hingegen nach unten sacken, wenn sie sich aufwärts bewegen würde [Lillywhite (1989)].

Auch das Kreislaufsystem des Menschen musste in der Zeit, als er sich zum aufrecht gehenden Wesen entwickelte, Veränderungen durchmachen, um sich dieser neuen Situation anzupassen. Es musste einerseits das Blut nun auf ein höheres Niveau transportiert werden, andererseits sollte verhindert werden, dass es zu einem Blutstau in den Gefäßen, vor allem der unteren Extremitäten, kommt. Ein solcher Blutstau entsteht durch den Gewichtsdruck der darüberliegenden Blutsäule vor allem dann, wenn die Gefäße dehnbar sind (Venen) und sich daher leicht ausweiten. Der Blutstau bzw. der Schweredruck in den erweiterten Gefäßen kann zu vielen Krankheiten führen, wobei die bekannteste davon die Krampfadern sind.

### A. Basiswissen über Blutdruckverhältnisse im Körper

#### Von liegender zur aufrechten Position

Beim Übergang vom Liegen zum Stehen ändert sich auf Grund der Schwerkraft auf das Blut der Druck im Gefäßsystem (Bild 4.2.1.1). Sieht man von Druckänderung auf Grund der Strömung des Blutes ab, muss der Druck in Venen und Arterien entsprechend dem Schweredruck der Blutsäule von oben nach unten zunehmen. Der Schweredruck einer Blutsäule ist  $p = \rho \cdot g \cdot h$ , wobei  $\rho = 1,06 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  (Dichte des Blutes),  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$  und  $h$  die Höhe der Flüssigkeitssäule ist. Setzt man die Werte ein, so erhält man für 1 m Bluthöhe einen Druck von  $p = 10,4 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2} = 10,4 \text{ kPa}$ . Bei einem Menschen der Größe 1,7 m sollte daher

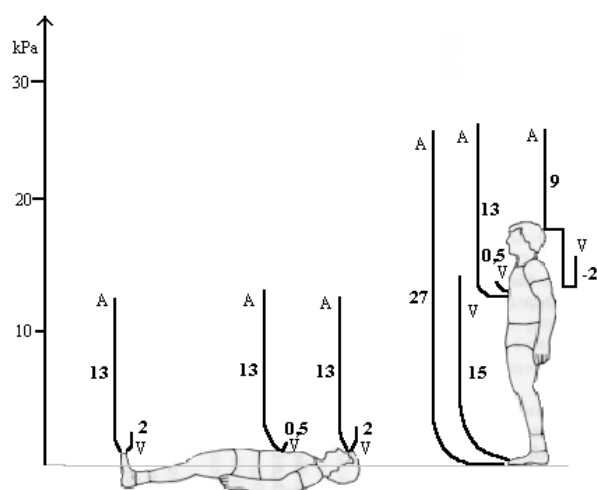


Bild 4.2.1.1: Blutdrücke in den Arterien (A) und in den Venen (V) bei einem Menschen in liegender und in aufrechter Position. In den Kopfvenen eines aufrecht stehenden Menschen ist der Druck negativ.

der Druckunterschied zwischen Kopf und Füßen ca.  $(10,4 \text{ kPa/m}) \cdot 1,70 \text{ m} = 17,7 \text{ kPa}$  betragen. Da auch in aufrechter Position der Druck im rechten Vorhof bzw. in den herznahen Hohlvenen vom Herz auf etwa Null gehalten wird, wächst der Druck in den Venen nach unten bis auf 13,5 kPa an und kann in den Beinen ein Ausdehnen der Venen mit daraus folgendem Blutstau verursachen. Nach oben nimmt der Druck ab. Die Venen oberhalb des Herzens, Hals- und Gesichtsvenen, können kollabieren, dann ist die Vene verschlossen, der Druck ist auf Null abgesunken. In den starrwandigen Venen im Kopfbereich kann hingegen ein negativer Druck bis zu  $-2 \text{ kPa}$  entstehen. Berücksichtigt man nur den Schweredruck der Blutsäule zwischen Herz und Kopf ( $h \approx 40 \text{ cm}$ ), so würde man einen Druck von  $-4$



kPa erwarten. Aus verschiedenen Gründen, z.B. dem möglichen Venenverschluss, weicht der tatsächliche Wert von diesem ab.

Venen und Arterien unterscheiden sich deutlich in ihrer Dehnbarkeit. Venen sind im Vergleich zu den Arterien sehr viel weicher und daher leichter dehnbar. Beim Übergang vom Liegen zum Stehen erfolgt deshalb eine Umverteilung des Blutvolumens, vor allem in die Venen der unteren Extremitäten (etwa 0,5 l). Dies ist in Bild 4.2.1.2 dargestellt.

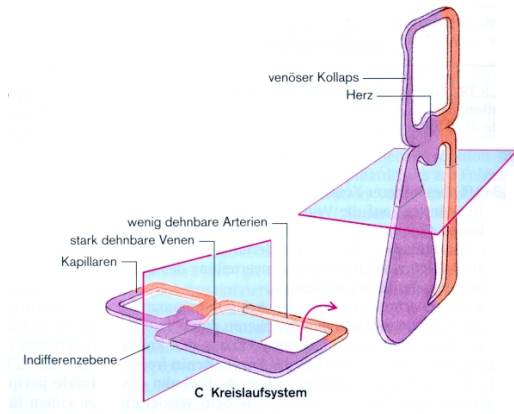


Bild 4.2.1.2: Volumenverschiebung des Blutes beim Übergang vom Liegen zum Stehen. (Indifferenzebene: Blutdruck in beiden Lagen gleich)  
[aus Klinker (1996)]

### Treibende Druckdifferenz

Das Blut bewegt sich auf Grund der Druckdifferenz zwischen Anfang (Ventrikel) und Ende (Vorhöfe) des Kreislaufs. Diese treibende Druckdifferenz bleibt unabhängig von der Lage, die der Körper einnimmt, denn jede Veränderung des Schweredruckes in den Venen bewirkt dieselbe Veränderung in den Arterien (die Schwerkraft wirkt auf das Blut in beiden Gefäßarten gleich).

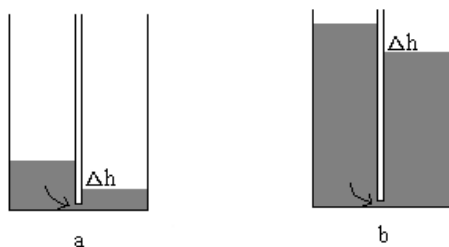


Bild 4.2.1.3: In b herrscht auf beiden Seiten ein höherer Schweredruck als in a. Die für den Fluss verantwortliche Druckdifferenz  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$  ist wegen der gleichen Höhendifferenz  $\Delta h$  jedoch in beiden Fällen gleich groß.

Bild 4.2.1.3 versucht zu veranschaulichen, wie trotz derselben Druckdifferenz  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$  unterschiedliche Schweredrucke auftreten können. Bild 4.2.1.3a würde die Situation eines fast horizontal liegenden Körpers, Bild 4.2.1.3b eines aufrecht stehenden Körpers darstellen. In Bild 4.2.1.3b ist der Schweredruck im Fußbereich sowohl auf der linken Seite (Arterie) als auch auf der rechten Seite (Vene) größer als in Bild 4.2.1.3a. Die für den Fluss verantwortliche Druckdifferenz bleibt aber in beiden Situationen gleich.

### Das „periphere Herz“

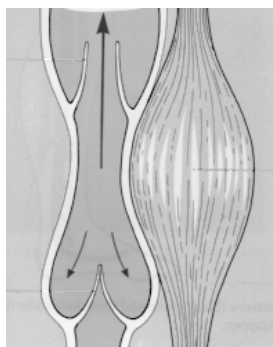


Bild 4.2.1.4: Taschenklappen und Muskeln unterstützen den Rückstrom des Blutes

Bei aufrechter Körperhaltung bewirkt ein großer Schweredruck eine starke Ausdehnung der Beinvenen, was zu einer gefährlichen Einsackung des Blutes führen kann.

Was ist der Motor, der den Rücktransport des Blutes zum Herzen unterstützt und gleichzeitig den Schweredruck in den Beinen reduziert? Es ist das sogenannte „periphere Herz“, d.h. die Muskeln in denen die Venen verlaufen, die sich bei der Bewegung zusammenziehen, dabei verkürzt und dick werden und so die blutgefüllten Venen herzwärts auspressen. Bei jedem Schritt wird das Netz der Venen, das sich im Fuß befindet, wie ein Schwamm ausgedrückt und das Blut nach oben in Richtung des Herzens gepresst. Wenn es zurückfließt, schließen sich die sogenannten Taschenklappen und blockieren so einen weiteren Rückfluss (Bild 4.2.1.4). Lässt man einen Menschen nach längerem

rem Stehen wieder ein paar Schritte gehen, so beobachtet man, dass der Blutdruck in den Fußrückenvenen von 12 kPa auf 4 kPa sinkt [Golehofer (2000)]. Einen weiteren Beitrag für den Rücktransport des Blutes liefert der Sogeffekt des Herzens, indem in der Anspannungsphase der rechte Vorhof einen Unterdruck erzeugt, bzw. der Sogeffekt der Atmung, indem beim Einatmen ein Unterdruck im Brustraum entsteht und damit der Venendruck im Brustraum absinkt. Auch die arteriellen Pulsationen tragen zum Rücktransport etwas bei, denn Arterien und Venen liegen oft unmittelbar nebeneinander, so dass die Arterien die Venen pulsierend einengen.

### Anatomie der Venen in den unteren Extremitäten

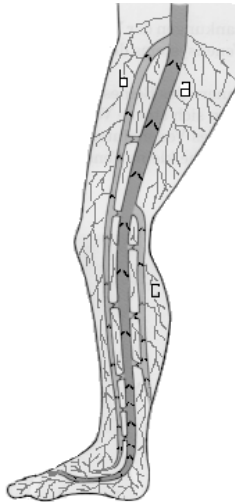


Bild 4.2.1.5: Die wichtigsten Venen in den Beinen: a Leitvene, b große Rosenader und c kleine Rosenader

In den Füßen gibt es ein Netz von zahlreichen, kleinen Venen, die mit den Leitvenen verbunden sind. Die Leitvenen sind tief im Inneren des Beines liegende starke Venenstämme. Verbindungsvenen von den Hautvenen, sowie zahlreiche, kleine Venen aus den Muskeln münden in die Leitvenen ein. In ihnen fließt mehr als 80 % des Venenblutes zum Herzen zurück. Außerhalb der Muskulatur, im Unterhautgewebe, liegt das oberflächliche Venensystem. Markant sind zwei Hauptstämme, die große und die kleine Rosenader (Bild 4.2.1.5).

Da das ganze Blut, das in den Arterien fließt, auch zum Herzen zurückfließen muss und die Fließgeschwindigkeit in den Arterien höher als in den Venen ist, muss die Summe der Querschnittsflächen der Venen größer als die der Arterien sein (Kontinuitätsgleichung).

Die Richtung des Stromes von den Füßen zum Rumpf und von der Oberfläche zur Tiefe wird jeweils durch die Taschenklappen bestimmt. Die Anzahl der Taschenklappen ist im unteren Bereich der Beine größer, weil dort ein höherer Schweredruck herrscht.

### Krampfadern

Das Auftreten von Krampfadern in den Beinen ist ein altbekanntes Leiden. Schon die Römer, die bevorzugt beinfreie Kleidung trugen und daher diese unschöne Erscheinung sichtbar machten, wussten davon zu berichten. Wer sich mit römischer Literatur beschäftigt weiß, dass kein geringerer als Cicero erheblich unter Krampfadern litt.

Dieses Leiden ist nicht lebensbedrohlich, aber viele Menschen, vor allem Frauen, sind davon betroffen. Es ist zunächst ein ästhetisches Problem vor allem für diejenigen, die kurze Mode tragen wollen.

Krampfadern sind erweiterte, serpentinenartig geschlängelte Venen, die an der Hautoberfläche liegen und sich auf Grund einer Undichtigkeit der Venenklappen ausbilden. Wenn diese nämlich nicht mehr gut schließen, fließt Blut nach unten zurück. Das zurückstauende Blut bewirkt eine Gefäßerweiterung vor allem bei den oberflächlichen Venen, die nicht die Stütze umgebender Muskulatur haben. Bei Menschen mit der Veranlagung zu gering elastischem Bindegewebe wird die Ausbildung von Krampfadern noch beschleunigt. Haben einige Venenklappen einen hohen Grad der Undichtigkeit und die Menge des zurückgestauten Blutes wird sehr groß, so müssen die darunterliegenden Klappen einem noch höheren Druck standhalten. Dazu kann noch ein Druck durch Jogging, Springen etc. kommen, weil eine zusätzliche Beschleunigung wirkt. Einem solchen Druck können auch ursprünglich gesunde Venen nicht mehr auf Dauer standhalten und sie werden ebenfalls insuffizient.

Wenn Krampfadern nicht behandelt werden, treten sie immer häufiger und stärker verzweigt auf und sie können Ursache für schwerere Krankheiten sein (Phlebite, Thrombose).

Heute gibt es je nach Indikation eine Reihe von Behandlungsmethoden. Diese reichen vom einfachen Verschließen einer kleinen schadhafte Vene bis zum totalen Entfernen („stripping“) einer schwer insuffizienten Rosenader. Glücklicherweise ist es nicht mehr so wie in früheren Zeiten, als man sich die Krampfadern auf so radikale Weise entfernen ließ, besser gesagt ausreißen ließ, dass mancher daran starb.

Es gibt aber auch eine Reihe von vorbeugenden Maßnahmen, um die Bildung von Krampfadern zu verhindern oder zumindest hinauszuzögern. Dazu gehören vor allem Bewegen der Wadenmuskeln, Hochlagern der Beine und Tragen von medizinischen Kompressionsverbänden.

Die Frage, welches der beste Sport bei Krampfaderleiden ist, könnte unter den Schülern zu einer Diskussion führen, aus der hervorgeht, dass beim Schwimmen entweder der Körper horizontal liegt und es keinen Schweredruck gibt oder der Schweredruck des Wassers hebt den des Blutes auf. Außerdem bewirkt die Kälte des Wassers, ein leichtes Zusammenziehen der Venen. Daher sind Krampfadern im Wasser oft nicht zu erkennen.

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### Vorkenntnisse

Der Druck in Gasen und Flüssigkeiten sollte eingeführt worden sein.

### 1. Einleitung für die Schüler

Zur Einführung in die Unterrichtseinheit kann die Lehrkraft Informationen über die Anpassung des Blutkreislaufs in Laufe der Zeit mitteilen.

### 2. Aufbau des Blutkreislaufsystems

Anhand von Folien (Bild 4.2.1.6a und 4.2.1.6b) und ggf. Modellen aus der Biologiesammlung werden der Aufbau und die Funktion des menschlichen Herzens und des Blutkreislaufsystems besprochen bzw. wiederholt. Insbesondere sollte die Funktion des Herzens, Druckdifferenzen zwischen linker Herzkammer und rechtem Vorhof und entsprechend für rechte Herzkammer und linkem Vorhof zu erzeugen, betont werden. Weiterhin sollten die Strömungswiderstände in den verschiedenen Gefäßen und die Zunahme des Gesamtquerschnitts von der Aorta bis zu den Kapillaren besprochen werden.

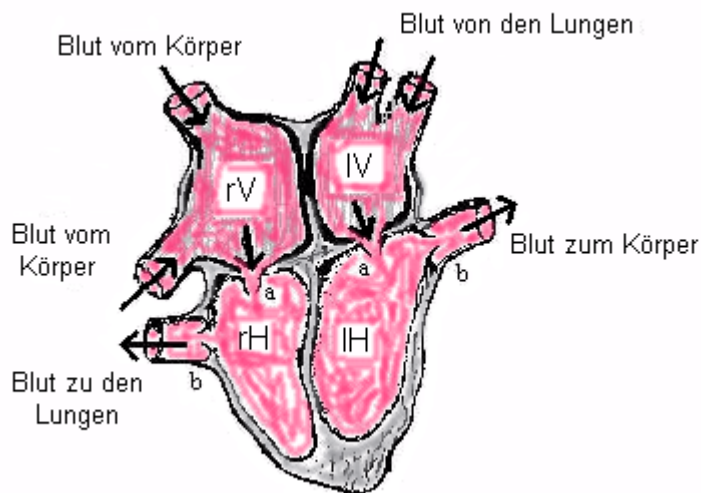


Bild 4.2.1.6a: Schematischer Aufbau des Herzens

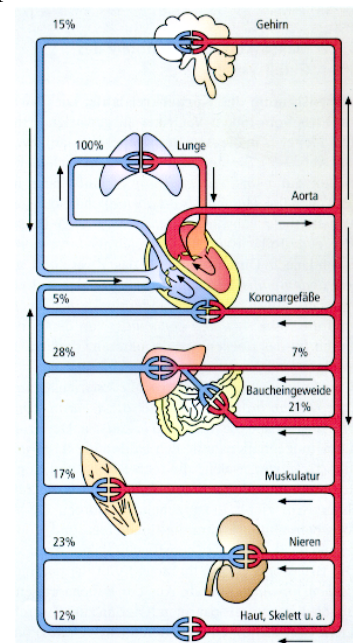


Bild 4.2.1.6b: Schema des Blutkreislaufs  
[(aus Thews (1999))]

### 3. Blutdruckmessung

Durch folgenden Versuch soll den Schülern erklärt werden, wie der Blutdruck mit der Manschettenmethode gemessen wird. Um dies im Lehrerexperiment zu zeigen, empfiehlt sich folgende Abwandlung der klassischen Methode.

Man benutzt als Druckmesser eine Manschette Ma, die mit Wasser gefüllt ist und mit einem engen Schlauch von ca. 2 m Länge verbunden ist (Bild 4.2.1.7). Am Ende des Schlauches befindet sich ein Wasserbehälter B, um den Schlauch immer mit genügendem Wasser zu versorgen. Dieses System erlaubt es durch Heben und Senken des Behälters den Druck in der Manschette zu regulieren und zu messen. Man beachte, dass 1m Wasserhöhe einem Druck von ca. 10 kPa (76 mm Hg) entspricht.

Die Manschette besorgt man sich in einer Apotheke, Arztzubehörhandel oder man begnügt sich mit einfachen Hilfsmitteln wie Kinderschwimmflügel o.ä..

Stehen in der Schule ein Mikrophon, ein Verstärker und ein Lautsprecher zur Verfügung, kann man das Schlauchende des Stethoskops an das Mikrophon setzen, so dass die ganze

Klasse über den Lautsprecher den Blutstrom hören kann [Kruse (1990)]. Zusätzlich können die Schüler die Signale auf dem Oszilloskop beobachten.

Der zum Messen verwendete Schlauch soll nicht zu eng sein, sonst fließt das Wasser zu langsam und die Messung dauert lang (gut geeignet ist ein Schlauch mit ca. 1 cm Durchmesser). Der Blutstrom soll nur möglichst kurze Zeit unterbunden werden, um den Unterarm nicht zu lange einer Unterversorgung auszusetzen.



Bild 4.2.1.7: Blutdruckmessung durch eine Wassersäule. Dabei sind M bzw. S das Mikrophon bzw. das Stethoskop zum Empfangen des Geräusches, Ma die Manschette, B der Behälter zur Wasserversorgung, O das Oszilloskop, V und L der Verstärker und der Lautsprecher.

#### **4. Statische Blutdruckverhältnisse im menschlichen Körper**

Mit Hilfe eines einfachen Modells werden die Blutdruckverhältnisse im menschlichen Körper simuliert, insbesondere beim Übergang vom Liegen zum Stehen.

Diese Simulation weicht von der Realität ab, denn der Versuch betrachtet den arteriellen Druck im statischen Fall, d. h. es wird nicht berücksichtigt, dass das Blut sich bewegt. Das Gefäßsystem wird stark vereinfachend durch kommunizierende Gefäße ersetzt.

Die Schüler können in jedem Fall erkennen, dass der Blutdruck sowohl in den Arterien als auch in den Venen wegen der aufrechten Körperposition in den Beinen zunimmt und im Kopf abnimmt.

**Beschreibung des Modells:**

An einem Holzbrett, das Form und Größe eines Menschen hat, befestigt man verbundene Schläuche. Diese sollen die Hauptgefäße eines Menschen darstellen, die durch den ganzen Körper verlaufen. Man kann diese Schläuche mit noch anderen, verschieden großen Schläuchen verbinden, mit Querverbindungen oder auch toten Enden versehen, um eine Art Gefäßsystem zu schaffen. Links und rechts an den beiden Schlauchöffnungen (im Kopf und in den Füßen) werden zwei weitere, senkrecht nach oben zeigende Schläuche kleineren Durchmessers mit einer Skala zur Druckmessung angebracht (Bild 4.2.1.8). Einer soll die Druckverhältnisse im Kopf, der andere in den Füßen darstellen. Zuletzt wird in der Position, in der sich ungefähr das Herz befinden würde, ein weiterer Schlauch angebracht, der in einen Wasserbehälter (B) mündet. Durch Heben und Senken dieses Behälters wird ein vom Herzen erzeugter Blutdruck simuliert.

Wenn man nun das Schlauchsystem mit gefärbtem Wasser füllt, so beobachtet man, dass bei waagrechter Stellung unseres Systems die Wasserstände in den Messschläuchen auf dasselbe Niveau steigen. Man kann weiter feststellen, dass die Wasserstände den Auf- und Niederbewegungen folgen, die man mit dem Behälter vollführt. Bringt man nun das „Gefäßsystem“ in schräge oder senkrechte Stellung, so sehen wir, dass die Flüssigkeitssäulen unterschiedlich hoch sind. Die Flüssigkeitssäule am Fußende ist wesentlich höher geworden, es herrscht somit



ein wesentlich größerer Druck im Fußteil als im Kopfteil. Auch in diesem Fall folgen die Wasserstände in den Messschläuchen den Auf- und Niederbewegungen des Behälters. Die Abweichungen von einem echten Körper sollen qualitativ festgestellt werden. Außerdem kann man erkennen, dass auch bei den Venen, da auf Herzhöhe der Druck bei null gehalten wird, Druckänderungen vom Liegen zum Stehen stattfinden.

Anhand einer Folie mit Bild 4.2.1.1 werden die Blutdruckwerte an den verschiedenen Körperstellen für die liegende und die stehende Position gegenübergestellt.

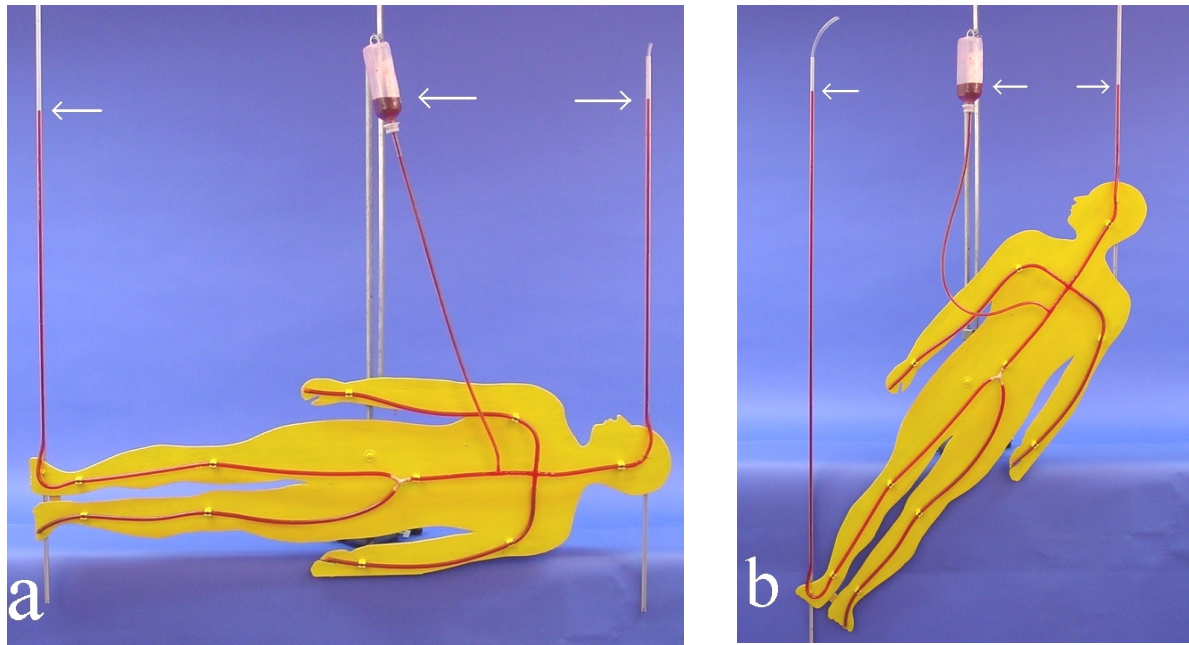


Bild 4.2.1.8: Blutdruckverhältnisse im menschlichen Körper beim Übergang von der liegenden (a) zur aufrechten Position (b). Links und rechts sind senkrechte Schläuche zur Druckmessung; B ist der Behälter, wobei man durch Heben und Senken den Herzdruck simulieren kann.

### 5. Auswirkungen des Schweredruckes bei einem Blutgefäß

Man beginnt mit einem einfachen Versuch, der die Umverteilung des Flüssigkeitsvolumens auf Grund der Änderung des Schweredruckes beim Übergang einer Flüssigkeitssäule von einer horizontalen in eine vertikale Position veranschaulicht.

Man verwendet zwei Luftballons wie sie in Bild 4.2.1.9 dargestellt sind. Diese füllen sich verschieden stark mit Wasser auf, abhängig von der Position des „Gefäßsystems“. Wenn man die Wasserzufuhr vom Behälter unterbricht, kann sich der obere Ballon völlig entleeren.



Bild 4.2.1.9: Die Ballons sind bei horizontaler Lage gleich stark gefüllt. Wegen des unterschiedlichen Schweredruckes bläht sich in vertikaler Lage der untere Ballon stärker auf und der obere wird kleiner.

## 6. Die Entstehung von Krampfadern

Anhand eines Folienbildes (Bild 4.2.1.10) wird das Aussehen von Krampfadern gezeigt. Dann wird mit Hilfe der Folie (Bild 4.2.1.4 und 4.2.1.5) die Funktion der Taschenklappen in den Venen erläutert und die Konsequenzen bei Störungen diskutiert.



Bild 4.2.1.10: Ausgeprägte Krampfadern  
Aus: Rubin & Farber: Pathology, Lippincott  
Philadelphia 1994

## 7. Der „treibende Druck“

Das in diesem Schritt behandelte Problem ist recht anspruchsvoll und deshalb nicht für jede Klasse empfehlenswert.

Für den Blutfluss im menschlichen Körper ist der Druckunterschied zwischen Ventrikel (linke Herzkammer) und rechtem Vorhof verantwortlich. Nun wird das Problem aufgeworfen, ob diese das Blut durch den Körper treibende Druckdifferenz sich wie der Schweredruck ändert, falls sich der Körper aus der liegenden Position aufrichtet. Der folgende Versuch soll dies für den Kreislauf Herz-Beine-Herz simulieren (er demonstriert auch das Prinzip des Wasserhebers).

Man nimmt einen mit Wasser gefüllten Behälter und befestigt am Ausfluss einen langen Schlauch. In der Position A (entspricht dem liegenden Körper) verläuft er horizontal, das Schlauchende liegt etwas niedriger als das Wasserniveau im Behälter (Bild 4.2.1.11). Man misst als Maß für die treibende Druckdifferenz die Zeit, die notwendig ist, eine bestimmte Wassermenge ausfließen zu lassen.

Dann wiederholt man den Versuch, indem man den Schlauch hängen lässt (Position B, entspricht dem stehenden Körper), aber das Schlauchende auf derselben Höhe belässt. Man wird

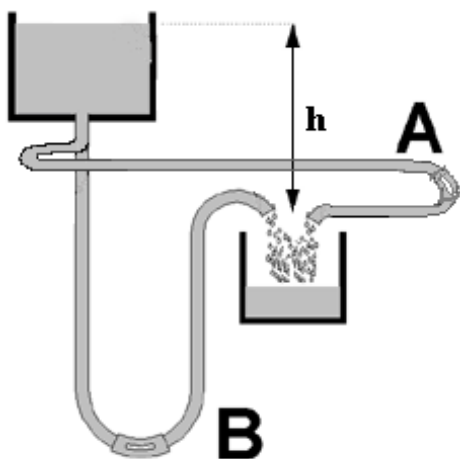


Bild 4.2.1.11: Unabhängigkeit der  
Auslaufzeit vom Verlauf des  
Schlauches.

feststellen, dass auch dieses Mal für die gleiche Ausflussmenge ungefähr dieselbe Zeit verstreicht.

Daher wird klar sein, dass nur der Höhenunterschied  $h$  zwischen Schlauchende und Oberfläche des ausfließenden Wassers bzw. der Druckunterschied  $\Delta p = \rho gh$  für die Auslaufzeit verantwortlich ist, und nicht der Verlauf des Schlauches.

Man kann auch eine Verengung in den Schlauch einbauen, die Auslaufzeit wird für alle Schlauchpositionen um die gleiche Zeit länger.

Befindet sich an einer Stelle des Schlauchs ein Loch, das mit einem dünnwandigen Schlauch (Kondom, Luftballon, o.ä.) ausgekleidet ist, so kann man erkennen, dass diese Stelle bei niedrigeren Lagen dicker wird, weil der Schweredruck größer ist als beim Schlauch in der hochgehaltenen Position.

Hält man den Schlauchteil nach oben (Blutkreislauf

über den Kopf im Stehen), wird der Druck im Vergleich zum atmosphärischen Druck negativ: das dünnwandige Fenster kann durch den äußeren Luftdruck zusammengedrückt werden und das Fließen verhindert werden.

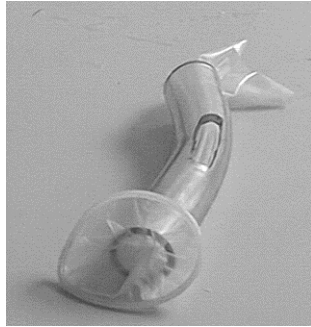


Bild 4.2.1.12: dünnwandiges Fenster zur Simulation der Auswirkung des Schweredrucks auf eine Vene

### Fragen zur Übung und Vertiefung

- 1) Wie groß ist der Schweredruck einer Blutsäule von 1 m Höhe?
- 2) Wie groß ist der Blutdruck in den Fußvenen eines aufrecht stehenden Menschen, wenn sich das Herz auf einer Höhe von 1,2 m befindet und die Venenklappen undicht sind? (Der Blutdruck auf Herzhöhe soll als null angenommen werden).
- 3) Leiden eher kleine oder große Menschen an Krampfadern?
- 4) Wie groß ist der Druckunterschied zwischen Innenvenen und Umgebung bei einem aufrecht stehenden Menschen, der bis zur Herzhöhe in Wasser steht, wenn wir annehmen, dass auf Herzhöhe der Druck in den Venen null in Bezug zum atmosphärischen Druck ist?

### Antworten

- 1) Der Schweredruck einer 1 m hohen Blutsäule ist  $p = m \cdot g/A = \rho \cdot V \cdot g/A = \rho \cdot h \cdot A \cdot g/A = \rho \cdot g \cdot h = 10^4 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = 10,4 \text{ kPa}$ , wobei  $\rho$  die Dichte des Bluts,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $h$  und  $A$  die Höhe bzw. die Grundfläche der Blutsäule sind.
- 2) Der Druck ist  $10,4 \text{ kPa/m} \cdot 1,2 \text{ m} = \text{ca. } 12,5 \text{ kPa}$
- 3) Größere Menschen leiden eher an Krampfadern, weil ihre Beinvenen bzw. Beinvenenklappen einem größeren Blutdruck ausgesetzt sind.
- 4) Wenn wir annehmen, dass auf Herzhöhe der Druck in den Venen null in Bezug zum atmosphärischen Druck ist, dann bleibt der Druckunterschied unter der Herzhöhe null, weil die Innendruckerhöhung nach unten ungefähr jener der Wassertiefe entspricht. Über der Herzhöhe ist der Druck in den Venen negativ, in Abhängigkeit von der Höhe und dem Fließwiderstand des Blutes.



## 4.2.2 Flusstörungen im Blutkreislauf

Die Verengung einer Arterie (Stenose) hat eine große Bedeutung in der Medizin. Denn diese Krankheit kann zu einem Gefäßverschluss und im schlimmsten Fall zu einem Herzinfarkt oder Schlaganfall führen, die beide heutzutage zu den häufigsten Todesursachen in den Ländern der westlichen Hemisphäre zählen.

Auch die Erweiterung einer Arterie (Aneurysma) kann gut zur Veranschaulichung der Bernoulli'schen Gleichung und auf höherem Niveau der Laplace'schen Gleichung eingesetzt werden. Aneurysmen und Stenosen sind interessante Erscheinungen, da ein Rückgang in der Regel nicht spontan erfolgt, wie es oft in der lebenden Natur der Fall ist.

### A. Basiswissen über Blutstrom und Gefäßverstopfung

#### Reynoldszahl und Blutströmung

Unter physiologischen Bedingungen strömt das Blut in den meisten Gefäßabschnitten laminar und lautlos. Bei dieser Strömungsform nimmt die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsschichten von der Achse des Gefäßes bis zur Wand hin kontinuierlich ab, an der Gefäßwand ist sie praktisch null.

Die laminare Strömung kann allerdings in eine turbulente Strömung übergehen, die durch Wirbelentstehung charakterisiert ist. Ein Hinweis, ob eine Strömung laminar strömt, wird durch die Reynoldszahl ( $Re$ ) bzw. durch eine Zusammenfassung einiger Faktoren geliefert. Es ist  $Re = 2r \cdot v \cdot \rho / \eta$ , wobei  $2r$  der Rohrdurchmesser,  $v = (V/t)/\pi r^2$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $\eta$  die dynamische Viskosität der Flüssigkeit sind. In einem geraden, langen Rohr kann für  $Re < 2000$  eine laminare Strömung, für  $Re > 2000$  eine turbulente Strömung herrschen. Für  $2000 < Re < 3000$  ist die Strömung instabil und kann von einer Art in die andere übergehen. Diese Werte nehmen bei Rohren mit Verengungen, Ausbeulungen, Rohrkrümmungen oder anderen Hindernissen schlagartig ab.

Eine turbulente Strömung findet bei erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten (z. B. bei Gefäßstenose während der Austreibungszeit) oder bei reduzierter Blutviskosität (z.B. bei schweren Anämien) statt.

#### Blutviskosität

In realen Flüssigkeiten versuchen die Nachbarpartikel (Atome bzw. Moleküle) infolge der Kohäsionskraft die gegeneinander gerichteten Verschiebewegung zu behindern, was zu Scherkräften führt.

Deshalb findet Reibung statt, wenn eine ebene Platte mit konstanter Geschwindigkeit parallel zu einer festen Wand verschoben wird und zwischen Wand und Platte sich eine Flüssigkeit befindet.

Die notwendige Kraft  $F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dx}$  zur Verschiebung ist proportional zur Fläche

der Platte  $A$  und zum Geschwindigkeitsgradienten  $\frac{dv}{dx}$  senkrecht zur Strömungsrichtung. Die

Proportionalitätskonstante  $\eta$  (Viskosität) ist ein Maß für die Stärke der inneren Reibung.

Bei vielen Flüssigkeiten hängt die Viskosität nur von der Temperatur ab und zwar wird sie mit steigender Temperatur geringer. Bei Gasen nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur zu.

Das Blut ist eine nicht-Newtonsche Flüssigkeit, d. h. seine Viskosität hängt nicht nur von der Temperatur (wie im Fall vom Wasser), sondern auch wegen der Deformierbarkeit und Aggregationsneigung der Blutbestandteile von der Zusammensetzung ab. Außerdem hängt die Blutviskosität von den Strömungsbedingungen, genauer den Scherkräften, ab. So nimmt die Vis-

kosität des Blutes mit dem Durchmesser der Gefäße  $< 300 \mu\text{m}$  ab, erreicht ein Minimum bei ca.  $10 \mu\text{m}$  und steigt in noch engeren Gefäßen (Kapillaren) wieder an, wobei sich die Erythrozyten deformieren müssen, um durch die Kapillaren zu gelangen (Bild 4.2.2.1).

Unter normalen Bedingungen beträgt die Blutviskosität in den Arterien  $3 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (3-4-mal diejenige von Wasser, auch wenn sich ihre Dichten nicht so sehr unterscheiden).

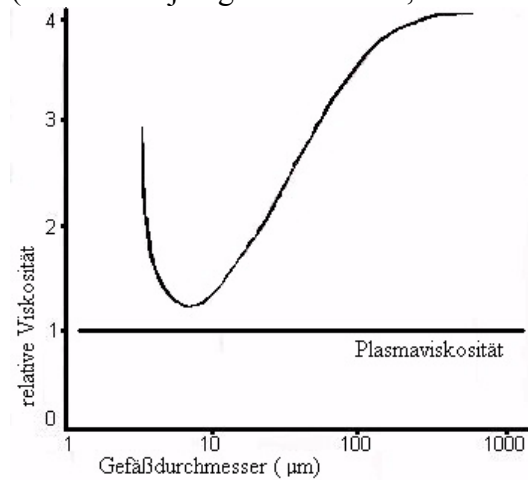


Bild 4.2.2.1: Blutviskosität in Abhängigkeit des Gefäßdurchmessers [nach Klinké (1996)]

Da der Strömungswiderstand in zylindrischen Röhren gemäß der Hagen-Poiseuille-Gleichung mit der Viskosität steigt, strömen viskosere Flüssigkeiten langsamer. Bei Steigerung der Blutviskosität muss deshalb, um den gleichen Blutfluss aufrecht erhalten zu können, neben einer Vasodilatation (Ausdehnung/Erweiterung) im Bereich der kleineren Gefäße, das Herz eine höhere Leistung bringen. Aus diesem Grund, sowie auch um ein Verstopfen der Gefäße zu verhindern, sollen Bergsportler viel Flüssigkeit (Wasser) trinken, damit das Blut dünn bleibt. Denn in größeren Höhen, wo eine geringere Sauerstoffkonzentration herrscht, bildet sich als Anpassung für einen effizienteren Sauerstofftransport, eine erhöhte Anzahl der Erythrozyten, die eine größere Viskosität des Blutes bewirkt.

## Die Arterien

Die Arterien verzweigen sich auf dem Weg durch den Körper zu immer kleineren und feineren Gefäßen. Die größte Arterie (Aorta) hat einen inneren Durchmesser von etwa 20 mm und eine Wandstärke von etwa 2,5 mm. Die feinsten Arterien (Arteriolen), die das Blut in die Kapillaren leiten, erreichen einen Durchmesser in der Größenordnung von  $10^{-5} \text{ m}$ .

Die Struktur einer Arterie ändert sich mit der Funktion, die sie ausführt.

Alle Arterienwände lassen aber drei Schichten erkennen: innen die Intima, in der Mitte die Media und außen die Adventitia.

Die Innenwand der Intima (Endothel) besteht aus einem geschlossenen Mosaik flacher Zellen, das die Höhlung der Arterien wie eine Tapete auskleidet. Diese Schicht ist gegen Scherkräfte, wie sie das fließende Blut ausübt, sehr widerstandsfähig. Das Endothel bildet Substanzen, welche die Adhäsion und Aggregation von Thrombozyten hemmen, damit Thrombusbildungen verhindert werden.

Die Media ist hauptsächlich für die Festigkeit und Elastizität der Wand verantwortlich. Sie setzt sich vor allem aus Elastin und glatten Muskelzellen zusammen, deren Anteile jedoch mit dem Arterientyp wechseln. Im Allgemeinen ist das elastische Gewebe stark in den herznahen Arterien entwickelt. Peripherwärts nimmt die Zahl der glatten Muskeln in der Gefäßwand kontinuierlich zu, das elastische Material ab.

Die Adventitia, die äußerste Schicht der Arterien, besteht vor allem aus Kollagen, einem Protein des Bindegewebes. Da die Adventitia kaum Elastizität und nur wenig glatte Muskelzellen besitzt, fehlen ihr auch die dynamischen Eigenschaften der Media. Sie trägt aber viel zur statischen Festigkeit der Arterienwand bei.

## Arterienstenose

Die Verengung einer Arterie wird meistens durch Ablagerung von Fettsubstanzen (Cholesterin) verursacht, in die zusätzlich Kalk eingelagert werden kann und dann das Blutgefäß im wahrsten Sinne des Wortes verkalkt (Arteriosklerose bzw. Arterienstenose).

Eine Verstopfung eines Herzkranzgefäßes führt zu einer Blutleere eines Herzbereichs und infolgedessen zum Absterben dieses Gewebes (Herzinfarkt). In den meisten Fällen ist es ein Thrombus (Blutgerinnsel), der ein Blutgefäß verstopft. Auch der Schlaganfall oder Gehirnschlag ist fast immer auf einen Verschluss eines Blutgefäßes durch ein Blutgerinnsel und das darauffolgende Absterben eines Gewebebezirkes zurückzuführen.

Bei gesunden Blutgefäßen werden Blutgerinnsel meist weiterbefördert und bleiben irgendwann in einem kleineren Blutgefäß stecken ohne großen Schaden zu hinterlassen. Sind jedoch größere Blutgefäße etwa durch Ablagerung von Fettsubstanzen verengt, so reichen kleine Blutgerinnsel aus, um das verengte Gefäß völlig zu verschließen und den Blutfluss zu unterbrechen. Betrifft es dann die Versorgung eines lebenswichtigen Organs, wie etwa Herz oder Gehirn, so kann ein Funktionsausfall des betreffenden Organs tödliche Folgen haben.

Die periphere Verschlusskrankheit, die durch arteriosklerotische Verengungen bzw. Verschlüsse der Extremitätenarterien entsteht, betrifft fast immer die Beine. Diese Durchblutungsstörungen sind normalerweise nicht lebensgefährlich, produzieren aber auf Grund einer Sauerstoffverknappung Krämpfe. Die betroffenen Personen - meistens handelt es sich dabei um älteren Menschen – werden dann während des Gehens von einem Krampf befallen, weil die Muskeln beim Laufen mehr Sauerstoff benötigen. Der Krampf lässt sie vor Schmerz plötzlich stehen bleiben. Um nicht aufzufallen, bleiben sie z.B. vor einem Schaufenster stehen. Deshalb nennt man im Volksmund diese Krankheit auch „Schaufensterkrankheit“.

### Anwendung der Bernoulli-Gleichung bei einer Stenose

Nehmen wir an, dass die innere Oberfläche einer Arterie z. B. durch eine Geschwulst an der Gefäßwand verkleinert ist.

Wenn der Blutfluss mit einer Geschwindigkeit  $v_1$  durch die Verengung mit der Querschnittsfläche  $S_2$  (normal  $S_1$ ) fließt, steigt in der Verengung die Strömungsgeschwindigkeit  $v_2$ , (siehe Bild 4.2.2.2).

Schüler denken intuitiv, dass das fließende Blut die Verengung mit Druck auf die Geschwulst das umgebende Gewebe ausweitet, aber das trifft nicht zu („hydrodynamisches Paradox“), denn der Druck gegen die verdickten Wände steigt nicht, sondern nimmt ab.

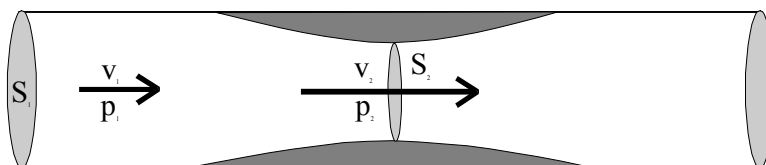


Bild 4.2.2.2: Verengung in einer Arterie. Das Blut fließt durch  $S_2 < S_1$ , daher ist die Strömungsgeschwindigkeit  $v_2 > v_1$  und der Druck  $p_2 < p_1$ .

Wenn wir annehmen, dass das Blut eine ideale Flüssigkeit ist, gilt die Bernoulli-Gleichung  $p_1 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$  wobei  $p_1$  und  $p_2$  der Druck vor der Verengung und in der Verengung ist. Da  $v_2 > v_1$  ist, muss  $p_2 < p_1$  sein. Mit anderen Worten, je größer der „dynamische Druck“ ( $\frac{1}{2} \rho \cdot v_2^2$ ) in der Verengung ist, desto kleiner wird der Druck  $p_2$  an diesem Ort, denn die Summe der Drücke muss konstant bleiben. Wenn der Druck, der nach allen Seiten (auch nach den Wänden hin) gleichmäßig wirkt, abnimmt, tendiert die verengte Stelle noch mehr zu verengen und eine weitere Druckabnahme zu bewirken. Die elastische Gefäßwand kann vom atmosphärischen Druck bzw. von den umgebenden Gefäßen zusammengedrückt werden.

Nach den obigen Betrachtungen müsste sich jede Verengung von selbst noch weiter verengen und schließlich zu einem Gefäßverschluss führen. Tatsächlich ist das nicht notwendigerweise der Fall, denn das Blut ist keine reine Flüssigkeit. Wenn sich die Verengung ganz zusammenschließt, kann der Blutdruck das elastische Gefäß wieder öffnen. Dazu müsste man auch betrachten, dass das Blut mit einem pulsierenden Druck strömt. Die Arterie öffnet und schließt sich dann im Zyklus der Druckschwankungen [Montesanti (1985)].

Um eine bessere Vorstellung zu bekommen, in welcher Größenordnung die Werte liegen, betrachten wir folgendes Beispiel: Nehmen wir an, dass das Blut sich unter einem Druck  $p_0$  durch eine Arterie bewegt, die sich an einer Stelle verengt. Sei  $S_1 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  (Durchmesser 5 mm) die innere Querschnittsfläche der Arterie,  $v_1 = 0,05 \text{ m s}^{-1}$  die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes und  $S_2 = 1/25 S_1$  (Durchmesser 1 mm) die Querschnittsfläche des verengten Teils. Für die Kontinuitätsgleichung ist  $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$ , d. h.  $v_2 = 25v_1$ . Die Bernoulli-Gleichung wird

$p_0 + \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 = p + \frac{1}{2} \rho (25v_1)^2$ . Setzt man die Werte ein, dann ergibt sich

$$p_0 + \frac{1}{2} (1,06 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}) \cdot (0,05 \text{ m s}^{-1})^2 = p + \frac{1}{2} (1,06 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}) \cdot (25 \cdot 0,05 \text{ m s}^{-1})^2$$

Für den Druck in der Verengung gilt dann:  $p \approx p_0 - 1 \text{ kPa}$

### Das Aneurysma

Das Gegenteil der Stenose, ein Aneurysma, tritt auf, wenn sich ein Bereich der Arterienwand auf Grund einer kongenitalen Schädigung, Trauma oder entzündlicher Vorgänge ausdehnt und der viskoelastische Gürtel, der den Druck trägt, geschwächt wird.

Wenn an der Aufweitung alle Arterienwandschichten beteiligt sind, entsteht eine spindelförmige Ausbeulung (*Aneurysma verum*) (Bild 4.2.2.3a). Reißen Intima und Media (z. B. durch ein Trauma) ein, ist die Adventitia einer Schlagader dem arteriellen Blutdruck ausgesetzt. Hält sie dem Druck stand, entsteht eine Aussackung (*Aneurysma falsum*), an deren Wand nur die äußeren Schichten beteiligt sind (Bild 4.2.2.3b). Das *Aneurysma dissecans* entsteht durch einen Intimaeinriss, wobei der Blutstrom einen Kanal zwischen den Gefäßschichten wählt und wieder in das ursprünglichen Gefäß einmündet (Bild 4.2.2.3c).

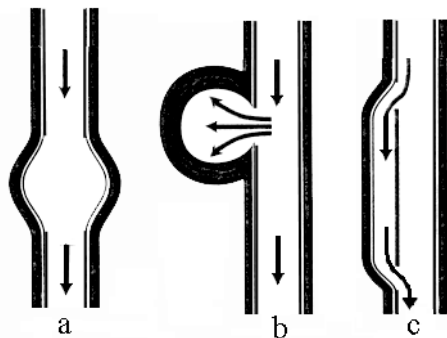


Bild 4.2.2.3: *Aneurysma verum* (a), *falsum* (b) und *dissecans* (c).

Aneurysmen können überall aus verschiedenen biomedizinischen Gründen entstehen. Oft treten sie an der Aorta sowie in den Gehirnarterien bzw. Gefäßstellen auf, wo es einen hohen hämodynamischen Stress gibt (z. B. in einer Gabelung oder nach einer Stenose, auf Grund der poststenotischen Wirbelbildung) [Hademenos (1993)].

Aneurysmen sind gefährlich, weil das Gefäß, wegen der Tendenz sich immer weiter auszudehnen, platzen kann. Es tritt dann innerlich Blut aus, mit Unterbrechung des versorgenden Blutflusses. Dies ist vor allem dann schwerwiegend, wenn es sich um eine

große Arterie oder um eine Arterie im Gehirn handelt. Bei Wandschädigung der Aorta beispielsweise kann sich eine derartige Ausbuchtung entwickeln, die man auf Grund der Gefahr zu platzen, operieren lassen soll [Alexander (1993)].

Während früher meist nur eine einfache Ausklemmung der entsprechenden Arteriensegmente durchgeführt wurde, liegen heute Erfahrungen vor, die verschiedene Eingriffe ermöglichen (z.B. Rohrprothese der Aorta).

Als venöse Aneurysmen werden sackförmige Venektasien bezeichnet, welche die Größe üblicher Varizen (Krampfadern) wesentlich überschreiten. Am häufigsten treten sie in den Halsvenen sowie in den Beinvenen auf.

### Laplace-Gleichung bei einem Aneurysma

Die Laplace-Gleichung verknüpft im Gleichgewichtszustand die Wandspannung und die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck (transmurale Druck) in einer elastischen Kugel oder in einem zylindrischen Rohr.

#### a) Kugelförmige Wand (großes Aneurysma)

Eine Kugelschale wird gedanklich in zwei Hälften aufgeschnitten (Bild 4.2.2.4). Der Druck der Flüssigkeit in der Kugelschale treibt die beiden Hälften auseinander, und zwar mit der Kraft  $F_D = \pi r^2 p$ . Diese muss im Gleichgewicht durch die Spannung  $\sigma$  in der Wand (angedeutet durch die kleinen Pfeile) kompensiert werden. Die Kraft durch die Wandspannung  $\sigma$  ist  $F_S \approx 2\pi r D \sigma$ . Die Gleichgewichtsbedingung  $F_S = F_D$  liefert  $p = \frac{2\sigma D}{r}$  (Laplace-Gleichung).

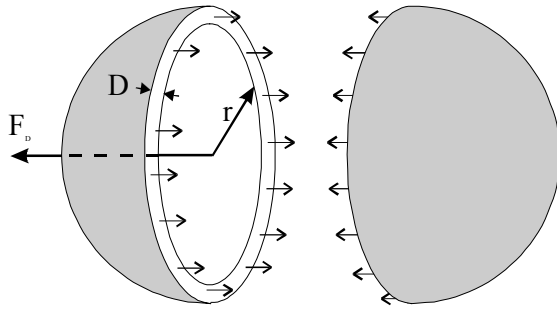
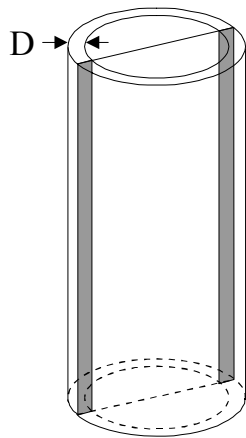


Bild 4.2.2.4: Herleitung der Laplace'schen Gleichung für eine Kugelschale mit der Wanddicke D

Der Druck p in dieser Beziehung ist der transmurale Druck.

#### b) Zylinderförmige Wand (Blutgefäß)



Wie eben denken wir uns einen Schnitt durch das zylinderförmige Blutgefäß der Länge l (Bild 4.2.2.5). Die auseinandertreibende Kraft ist  $2rlp$ , die gegenwirkende Kraft aufgrund der Wandspannung ist  $2Dl\sigma$ . Gleichsetzen der Kräfte liefert  $p = D\sigma/r$ , also bis auf den Faktor 2 den gleichen Ausdruck wie bei der Kugelschale. Bei gleicher Gefäßwandkrümmung und gleichem Druck ist die Spannung in der Wand bei einem kugelförmigen Aneurysma nur halb so groß wie bei einem zylinderförmigen.

Bild 4.2.2.5: Zur Ableitung der Beziehung zwischen Wanddicke, Wandspannung, Druck und Radius bei einem Zylindergefäß

### Das Platzen eines Aneurysmas

Nehmen wir an, dass sich an irgendeiner Stelle die Gefäßwand etwas ausgebeult hat (Gewebeschaden, Druckwelle o.ä.). In der Ausweitung wird die innere Querschnittsfläche größer, die Flussgeschwindigkeit nimmt ab und gemäß der Bernoulli-Gleichung steigt der statische Druck (Bild 4.2.2.6).

Der Gefäßinnendruck muss von der Gefäßwand getragen werden. Die dabei auftretende tangentielle Gefäßwandspannung kann nach dem Gesetz von Laplace kalkuliert werden:

$\sigma_T = p \cdot r/2D$  wobei p der statische Druck, r der Gefäßradius und D die Dicke des Gefäßes ist. Anhand dieser Beziehung kann man sich plausibel machen, dass mit der Ausdehnung eines

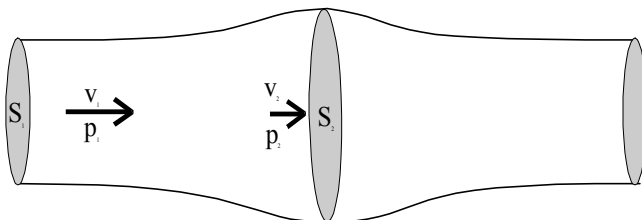


Bild 4.2.2.6: Aneurysma in einer Arterie.  $S_2 > S_1$ , daher ist die Strömungsgeschwindigkeit  $v_2 < v_1$  und der Druck  $p_2 > p_1$ .

Gefäßes die Wandspannung in dreifacher Weise ansteigt, durch Radius- und Druckzunahme und Abnahme der Wanddicke D. (Da das Volumen des Gefäßgewebes als annähernd gleichbleibend gelten kann, ist  $D \sim 1/r$ ). Es kann sich hier also leicht ein Teufelskreis mit immer weiterer Ausdehnung bis zum Riss entwickeln. Die obige qualitative Diskussion kann durch eine quantitative ergänzt werden, wodurch es möglich ist den kritischen Radius anzugeben, bei dem das Aneurysma platzt [Colicchia u. a. (2000 f)].

Außerdem muss man berücksichtigen, dass in einem erweiterten Gefäß das Blut wahrscheinlich nicht laminar fließt und Wirbelströme entstehen können. Diese Turbulenzen lassen die Gefäßwand vibrieren (bis 200 Hz), was zu einer Zerstörung der Wände führt.

Die Ausweitungen können sich jedoch in relativ langen Zeiträumen entwickeln (jährlich im Mittel um 0,4 cm) [Johansen (1982)], weil die Arterie normalerweise vom umgebenden Gewebe zusammengehalten wird und der Gewebedruck berücksichtigt werden muss. Manchmal bleibt ein Platzen des Gefäßes aus, weil das umgebende Gewebe die Gefäßwand abstützt.

### Der kollaterale Kreislauf

Normalerweise erfolgt eine spontane Weiterbildung von einer Stenose zu einem Totalverschluss in einem längeren Zeitraum, so dass sich ein leistungsfähiges paralleles *Kollateralsystem* ausbilden kann [Siegenthaler (1994)], das einen großen Teil des Bluttransportes übernimmt (Bild 4.2.2.7).

An der verengten Stelle in der Blutbahn steigt der Strömungswiderstand deutlich an (vor allem durch Wirbelbildung unmittelbar hinter der Engstelle). Um das Blut durch die verengte Stelle zu treiben, ist also eine weit höhere Druckdifferenz erforderlich als bei einem „normalen“ Stück Ader. Es entsteht somit eine große Druckdifferenz, und das Blut sucht sich einen anderen Weg und zwar in kollateralen Blutbahnen, die dazu beitragen die Durchblutung des

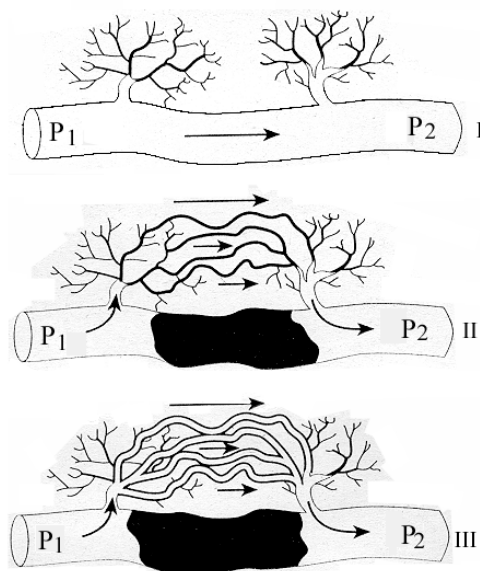


Bild 4.2.2.7: Entwicklung eines Kollateralkreislaufs von einer verschlossenen arteriellen Strombahn [nach Alexander (1993)]. Wenn etwa der gleiche Druck gegen die Gefäßwände herrscht ( $p_1 = p_2$ ), fließt kein Blut durch die kollateralen Gefäße (I). In II ist  $p_1$  größer als  $p_2$  und das Blut beginnt im Kollateralsystem zu fließen. Im Lauf der Zeit bildet sich ein echter Kollateralkreislauf aus und der Blutfluss darin wird noch größer (III).

Gewebes hinter dem Engpass zu verbessern.

Der Blutdruck bei einer Arterienstenose eines Menschen ohne und mit Kollateralkreislauf hängt auch von der Lokalisation der Stenose und von möglichen ausgleichenden Senkungswiderständen der versorgenden Organe ab. Bei einer Arterienstenose einer Extremität kann der Druck z.B. nach der Verengung von 13 kPa bis auf 10 kPa sinken, während er mit kollateraler Versorgung „nur“ bis auf 12 kPa sinkt [Hierholzer (1991)].

Wenn es nicht zur Ausbildung einer solchen kollateralen Verbindung kommt, kann diese mittels eines chirurgischen Eingriffes hergestellt werden (By-pass), indem man ein Stück einer Beinvene entnimmt und mit dieser die verengte Stelle überbrückt.

In der letzten Zeit versucht man häufiger ein verengtes oder verschlossenes Gefäß durch Einführen einer speziellen Sonde wieder zu öffnen (Ballon-Dilatation). Diese Sonde hat an der Spitze einen aufblasbaren Ballon, der von der Sonde zum Engpass geführt und dort aufgeblasen wird. So wird die Weite des Gefäßes vergrößert. Ein in die ursprüngliche Verengung eingeführtes Rohr verhindert eine erneute Verengung.

### Die Thrombose

Wenn sich in einem Blutgefäß ein Blutpfropf (Thrombus) mit Einbuchtungen ausbildet, wie es in Bild 4.2.2.8 dargestellt ist, wird der Druck  $p_2$  nach der Bernoulli'schen Gleichung geringer. In der Einbuchtung wird der Druck  $p_1$  wegen  $v = 0$  größer, so dass sich ein großer Druckunterschied ( $p_1 - p_2$ ) ergibt. Unter diesen Bedingungen kann sich ein Teil des Thrombus lösen und über den Blutstrom wegtransportiert werden, bis er an einer engeren Stelle stecken bleibt,

und zu einem gefährlichen Gefäßverschluss führen kann. Heute werden Blutgerinnsel durch Medikamente aufgelöst.

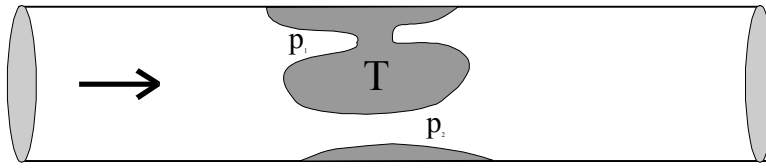


Bild 4.2.2.8: Ausbildung eines Thrombus. In der Einbuchtung herrscht ein größerer statischer Druck ( $p_1$ ) als in der Verengung ( $p_2$ ). Die Druckdifferenz ( $p_1 - p_2$ ) kann daher den unteren Teil (T) des Partikels leicht abreißen.

### Aortentaschenklappen

Es gibt jedoch auch positive Auswirkungen in der Blutbahn, die mit der Bernoulli-Gleichung erklärt werden können. So liegen die Taschenklappen nicht eng an den Gefäßwänden an, wenn das Blut in der Systole strömt, sondern stehen etwas von ihnen weg [Schmidt (1997)]. Das ist darauf zurückzuführen, dass auch die Klappen eine Art Verengung darstellen, die einen Druckabfall bewirken. Dadurch werden die Klappen nicht so stark an die Gefäßwand gedrückt. Die abstehenden Klappen können sich nun nach der Systole leichter schließen und einen Blutrückstrom vermeiden, der sonst bei eng anliegenden Klappen ungestört zurückfließen würde (Bild 4.2.2.9).

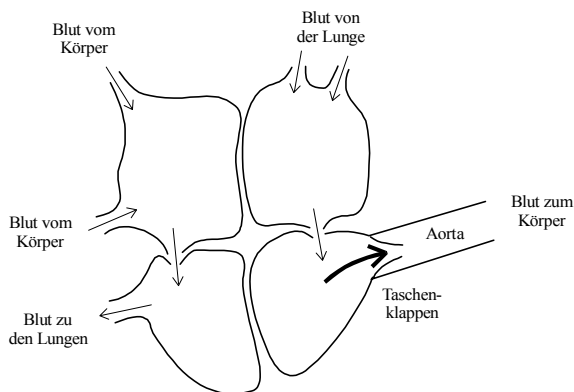


Bild 4.2.2.9: Die Taschenklappen liegen während der Blutströmung auf Grund des Bernoulli-Effektes nicht eng an den Gefäßwänden an. Die abstehenden Klappen haben den Vorteil, dass sie sich bei einem Blutrückfluss sehr leicht schließen.

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einleitung für die Schüler

Organe bzw. Zellen eines Organismus bedürfen zur Aufrechterhaltung der biologischen Funktionen einer kontinuierlichen Versorgung mit Stoffen, die aus der Umgebung oder aus anderen Organen stammen. Der Transport dieser lebenswichtigen Stoffe erfolgt im menschlichen Körper hauptsächlich durch den Blutkreislauf.

Die Blutströmung darf einen gewissen Mindestwert nicht unterschreiten, damit Organe und Muskeln ausreichend mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt werden. Behinderungen der Strombahn in einer Arterie wie Verengungen, Erweiterungen und andere Hindernisse führen zu einer Reduzierung oder einer Unterbrechung der Durchblutung und damit schließlich zu einer Einschränkung der Funktionsfähigkeit bis hin zum Gewebetod des betroffenen Organs.

### 2. Qualitative Einführung des Bernoulli'schen Gesetzes

Mit dem üblichen Demonstrationsgerät wird gezeigt, dass sich der Druck in einer in einem Rohr strömenden Flüssigkeit deutlich ändert, wenn sich die Geschwindigkeit ändert: an einer Verengung wird der Druck kleiner, bei einer Ausbeulung wird er größer. Da die meisten Schülerinnen und Schüler intuitiv das Gegenteil erwarten würden, sollte die Druckänderung plausibel gemacht werden:

Nach der Demonstration des Phänomens wird zunächst geklärt, dass durch jeden Querschnitt des Rohres pro Zeiteinheit die gleiche Flüssigkeitsmenge hindurchströmt. Damit muss die Flüssigkeit bei einem kleineren Querschnitt schneller fließen, bei einem größeren langsamer. An einem Übergang zu einem kleineren Querschnitt liegt also eine Geschwindigkeitszunahme vor, die Flüssigkeitselemente werden in Richtung der Verengung positiv beschleunigt. Dazu muss an der Seite der Verengung der Druck  $p_2$  kleiner sein als auf der entgegengesetzten Seite, so dass  $p_1 > p_2$  sein muss. Damit ist die Druckabnahme zurückgeführt auf die intuitiv verständliche Geschwindigkeitszunahme.

Zur Übung kann die Umkehrung, die Zunahme des Druckes bei Querschnittzunahme, thematisiert werden.

Zur Vertiefung kann diskutiert werden, weshalb der Druck längs des Rohres auch dann abnimmt, wenn keine Verengung vorliegt. Am Anschluss an der linken Seite des Ausflussrohres (Bild 4.2.2.10) liegt die Summe aus Schweredruck und Luftdruck  $p_0 = \rho gh + p_L$  vor, am rechten Ende nur der Luftdruck  $p_L$ . Der Druck sinkt längs des Rohres

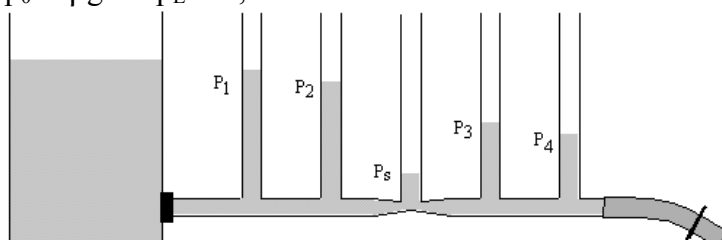


Bild 4.2.2.10: Demonstration der Druckänderung über einer Verengung des Querschnitts und der Druckabnahme auf Grund der Reibung

kontinuierlich bis auf den Wert  $p_L$ . Real haben wir Reibung, so dass stets pro Längeneinheit eine gewisse Druckdifferenz vorhanden sein muss, um die Flüssigkeit durch das Rohr zu treiben (analog muss auch an einem elektrischen Kabel eine Potentialdifferenz anliegen, damit ein elektrischer Strom fließt).

### 3. Stenose

Die Gefahr des Gefäßverschlusses durch die Druckabnahme an der Stelle einer Ablagerung (siehe auch Bild 4.2.2.2.), sowie die Gefahr des Abreißen eines Thrombus (vgl. Bild 4.2.2.8.), lässt sich mit dem in Schritt 2 erarbeiteten qualitativen Verständnis der Bernoulli'schen Gleichung besprechen.



#### 4. Kollaterale Verbindung (By-pass)

Als ein verblüffendes Beispiel dafür, dass der menschliche Körper Defekte selbständig beheben kann, kann anhand einer Folie über die Ausbildung eines kollateralen Blutkreislaufs bei einer Stenose berichtet werden. (Bild 4.2.2.7)

#### 5. Der Druck im Luftballon in Abhängigkeit vom Durchmesser

Zur Vorbereitung, wie gefährlich ein Aneurysma sein kann, wird zunächst an luftgefüllten Luftballons gezeigt, dass der Druck im Ballon mit der Größe abnimmt.

Ausgegangen wird von der Frage, ob beim Aufblasen eines Luftballons der Druck im Ballon, gegen den die zusätzliche Luft hinein geblasen werden muss, ansteigt. Zu Beginn des Aufblasens kann man spüren, dass es zunächst schwerer geht, bei bereits aufgeblasenem Ballon dagegen leichter.

Deutlicher und überzeugender ist der folgende Versuch:

Man bläst die Luftballons verschieden stark auf und stülpt sie je auf ein Ende des Glasrohres (Bild 4.2.2.11). Dann öffnet man den Hahn H. Die Luft strömt von dem kleineren Ballon in den größeren Ballon. Deshalb muss der Druck in dem kleineren Ballon größer sein.

Die dickere Gummihaut eines kleineren Luftballons presst die Luft in ihm stärker zusammen als die dünnere Haut des größeren Luftballons. Sorgen wir also für einen bestimmten konstanten Druck an der Öffnung dieses Ballons, gedanklich z.B. durch ein sehr großes Gefäß mit leicht komprimierter Luft, kann es passieren, dass er sich immer weiter aufbläst und schließlich platzt. Dies wenden wir jetzt auf Blutgefäße an, mit dem Unterschied, dass wir statt Luft die Blutflüssigkeit haben.

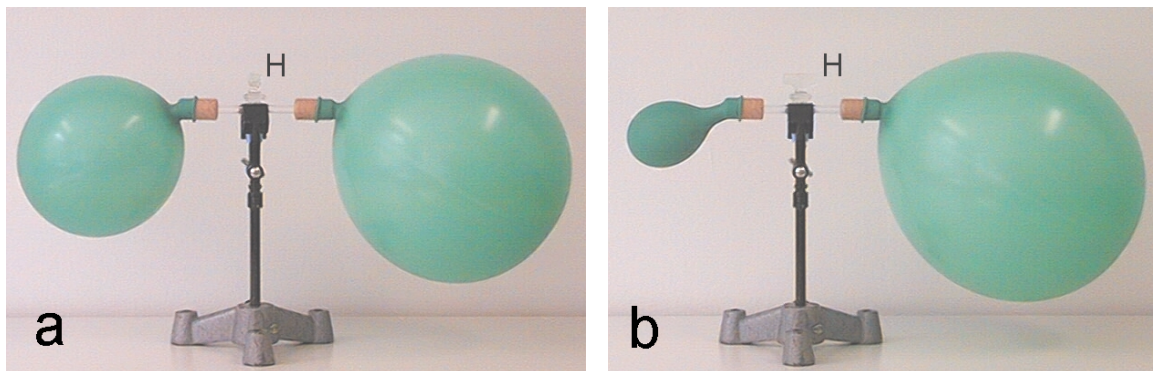


Bild 4.2.2.11: Bei zwei verschieden groß aufgeblasenen Luftballons (a), strömt Luft aus dem kleineren in den größeren Ballon (b), weil der Druck im kleineren Ballon größer ist.

#### 6. Das Aneurysma

Als Einstieg kann den Schülern ein Bild eines Aneurysmas gezeigt werden (z.B. Bild 4.2.2.12), dessen erschreckende Gestalt Aufmerksamkeit erregt.

Dann kann die Gefahr des Platzens eines Aneurysmas mit folgendem Versuch demonstriert werden (Bild 4.2.2.13):

In einen festen Schlauch wird ein Fenster geschnitten und die innere Wand des Schlauchs durch einen länglichen Luftballon ausgekleidet. Er ist das Analogon für eine defekte, zu „weiche“ Gefäßwand. Der Schlauch führt in ein Auffangbecken, der zweite zu einem Wasservorratsbehälter. Durch Heben dieses Behälters wird der Druck im Ballon vergrößert. Ab einer bestimmten Höhe beginnt der Luftballon sich immer weiter aufzublähen, obwohl die Höhe des Behälters gleich bleibt (Wasser nachfüllen, damit der Druck in etwa gleich bleibt!). Der Luftballon platzt nach kurzer Zeit, auch wenn die Höhe des Behälters bei einem schon vergrößerten Luftballon etwas verringert wird.

Im Klassengespräch wird den Schülerinnen und Schülern verdeutlicht, dass wie beim Luftballon das Ausdehnen mit größer werdender Ausbeulung immer leichter geht, die Gefäßwand dabei immer dünner wird und schließlich platzen kann.

In der Oberstufe könnte das Laplace'sche Gesetz abgeleitet und diskutiert werden.

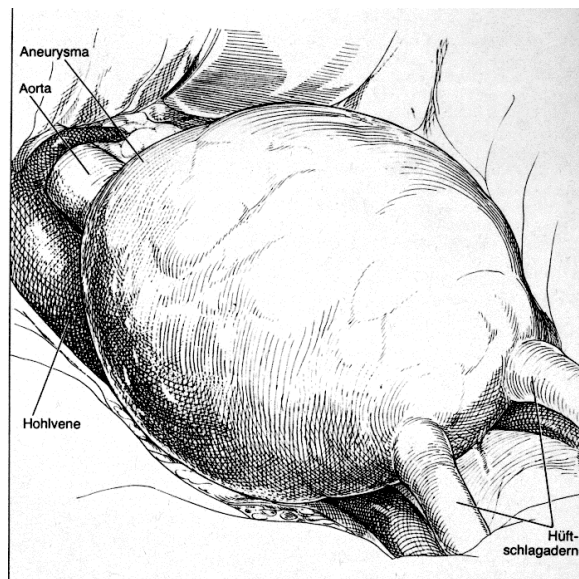


Bild 4.2.2.12: Gestalt eines großen Aneurysmas [aus Johansen (1982)]



Bild 4.2.2.13: Simulationsversuch zum Aneurysma: Aufgeblähter Luftballon

## 4.3 Umgebungsdruck und Atmungsstörungen

Die Atmung ist interessant, weil sie eine lebenswichtige Funktion für den Körper hat, nämlich die Versorgung mit Sauerstoff und den Abtransport von Kohlendioxid. Außerdem interessieren sich junge Menschen für Sport und Bewegung in der Natur. Bei Sportarten wie Bergsteigen und Tauchen kann es zu extremen Verhältnissen kommen, die zu einem großen Teil auf den herrschenden Umgebungsdruck zurückzuführen sind. Der Körper passt sich nur langsam dem niedrigen Luftdruck beim Bergsteigen in großen Höhen an [Zink (1985)]. Das andere Extrem sind die enormen Wasserdrücke, auf die sich der Körper beim Tauchen einstellen muss.

Die Schülerinnen und Schüler werden im Verlauf der Einheit

- den Druck in verschiedenen Höhen und in verschiedenen Tiefen berechnen lernen;
- erkennen, dass eine Druckdifferenz das Gas strömen lässt;
- erkennen, dass Druckdifferenz und Wegwiderstand in Bezug stehen;
- die wichtigsten Komponenten des Atmungssystems kennen lernen;
- die Beziehung zwischen Lungen- und Systemkreislauf verstehen;
- Atmungsprobleme und unangenehme Zwischenfälle kennen lernen.

### A. Basiswissen über die Atmungsmechanik

#### Aufgabe des Atmungssystems

Der menschliche Körper braucht zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur und zum Leisten von Arbeit eine bestimmte Energiemenge. Ein Großteil der Energie wird durch die Verbrennung von Nährstoffen gewonnen. Jede Zelle des Organismus muss daher mit Sauerstoff versorgt werden. Bei dem oxidativen Abbau von Nährstoffen entstehen wiederum Abfallprodukte (z. B. Kohlendioxid), die aus den Zellen an die Außenluft abgegeben werden müssen.

Bei kleinen und wenig entwickelten Tieren (z. B. Qualle, Regenwurm) atmen die Zellen direkt über die Haut. Bei Menschen genügt die Gasdifusion durch die Haut (etwa  $1,8 \text{ m}^2$ ) zur Bewältigung des relativ großen Stoffwechsels nicht, weil ein verhältnismäßig dickes Gewebe zwischen Hautkapillaren und Luft vorhanden ist, so dass nur ein sehr geringer Gasaustausch (ca. 1%) stattfindet.

Hauptaufgabe des Atmungssystems ist die Sauerstoffsättigung des Blutes auf seiner Passage durch die Lungen durch Aufnahme von Sauerstoff und die Abgabe von Kohlendioxid. Das Atmungssystem hilft dem Körper zu atmen, d.h. Gase mit der Umgebung auszutauschen, indem es das Blutkreislaufsystem mit der Atmosphäre verbindet, die einen unbegrenzten Vorrat von Sauerstoff bietet und eine unbegrenzte Deponie für Kohlendioxid aus dem oxidativen Zellstoffwechsel darstellt.

#### Umgebungsdruck

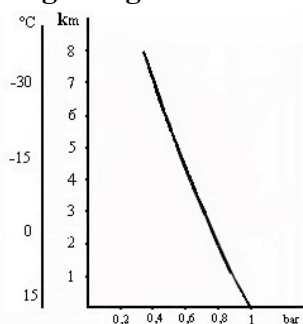


Bild 4.3.1: Temperatur und Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe

Durchschnittlich lastet auf jedem Quadratzentimeter der Erde in Meereshöhe eine Luftsäule mit einer Masse von etwa 1 kg. Ihre Gewichtskraft erzeugt daher einen Bodendruck von ca.  $10 \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . Mit zunehmender Höhe wird die darüber liegende Luftsäule bzw. das Luftsäulengewicht kleiner und der Druck nimmt bei normalen Bedingungen pro 100 m um ca. 0,01 bar ab. Da auch die Luftdichte mit zunehmender Höhe abnimmt, wird die Druckabnahme/km kleiner. Die Barometrische Höhenformel  $p(h) = 1 \text{ bar} \cdot e^{-h/8432\text{m}}$  beschreibt die Abhängigkeit des Druckes von der Höhe.

Zu bemerken ist auch, dass mit zunehmender Höhe nicht nur der Druck, sondern auch die Temperatur abnimmt und zwar in Mittel um ca. 6,5 °C/km (Bild 4.3.1).

Unter Wasser muss zum Luftdruck (1 bar) der Schweredruck des Wassers summiert werden. Der Schweredruck des Wassers nimmt pro 10 m Tiefe um ca. 1 bar zu.

### **Zustandsgleichung des idealen Gases**

Die allgemeine Gasgleichung bestimmt das Verhalten eines idealen Gases:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

wobei  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $n$  die Zahl der Mole,  $R$  die allgemeine Gaskonstante und  $T$  die Temperatur in Kelvin ist. Diese Gleichung gilt in guter Näherung für Gase mit geringer Dichte (z. B. Luft bei atmosphärischem Druck).

### **Partialdruck**

Bei einer Gasmischung (Luft) tragen alle darin enthaltenen Gase zum Druck bei. Jedes einzelne Gas liefert zum Gesamtdruck einen Beitrag (Partialdruck). Bei idealen Gasen ist der Partialdruck eines Gases gleich dem Druck, den dieses ausüben würde, wenn es sich allein in dem gesamten Volumen befände, das die Gasmischung einnimmt (Dalton'sches Gesetz). Der Gesamtdruck entspricht also der Summe der Teildrücke seiner Bestandteile:

$$p = p_A + p_B + p_C + \dots$$

Will man die allgemeine Gasgleichung und das Dalton'sche Gesetz bei der Lungenatmung anwenden, dann muss vom Gesamtdruck  $p$  noch der Sättigungsdampfdruck  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  des Wasserdampfs abgezogen werden. Das Gas in der Lunge ist mit Wasserdampf gesättigt und für dieses gilt bei 37°C das ideale Gasgesetz natürlich nicht mehr.

Wenn  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ , ... die notwendigen Volumen der einzelnen Gase zur Entstehung des Drucks  $p$  sind, d. h.  $V_A + V_B + V_C + \dots = V$ , sind die Partialdrücke nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz  $p_A = p \cdot V_A/V$ ,  $p_B = p \cdot V_B/V$  ...

Luft, die unter normalen Bedingungen als ideales Gas betrachtet werden kann, besteht aus ca. 21 Vol % Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und ca. 79 Vol % Stickstoff (N). Bei einem Gesamtdruck  $p$  ist daher der Partialdruck  $p_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot p$  und  $p_N = 0,79 \cdot p$ .

### **Aufbau des Atmungssystems**

Das Atmungssystem besteht aus mehreren luftführenden, mit Schleimhaut ausgekleideten Höhlen und Röhren: Die Nasenhöhle, der Rachen, der Kehlkopf, die Luftröhre, die Bronchien und die Bronchiolen.

Die Luftröhre teilt sich an ihrem unteren Ende in die beiden Hauptbronchien. Jeder Hauptbronchus teilt sich innerhalb der Lunge zuerst in kleinere Bronchien auf. Diese verzweigen sich weiter und bilden die noch feineren Bronchiolen. Die Bronchiolen wiederum verzweigen sich immer weiter bis zu mikroskopisch kleinen Ästchen (Alveolargängen), die in die Alveolen münden. Die Alveolen sind (etwa 300 Millionen) membranöse Lungenbläschen (Durchmesser 0,2 - 0,6 mm), über deren Kapillarnetze der Gasaustausch hauptsächlich erfolgt. Die Alveolen, auch wenn sie nur mit wenigen Prozenten an der Körpermasse beteiligt sind, haben eine riesige Oberfläche (50 - 100 m<sup>2</sup>) (bei Bergbewohnern etwas größer als bei Tieflandbewohnern), damit sie die erforderliche Gasdiffusion gewährleisten können. Die beiden resultierende Lungen sind schwammige Organe, die wegen ihres Aufbaus aus elastischen Fasern die Tendenz haben, sich zusammenzuziehen.

Das Volumen des einzelnen Atemzugs ist ca. 0,5 l bei ruhiger Atmung und bis 4 l bei tiefer Atmung. Auch nach maximaler Ausatmung bleiben in den Lungen noch mehr als 2 l zurück (Residualvolumen). Die Bedeutung des Residualvolumens besteht darin, dass die eingeatmete frische Luft in Folge des Mischeffekts nur geringe zeitliche Schwankungen in der Zusammensetzung der Alveolarluft bewirkt.

## **O<sub>2</sub>-Diffusion**

Sauerstoff geht von der Lunge nicht direkt in die Blutbahn über, sondern muss die alveolare und kapillare Membran (ca. 1 µm) passieren, bevor er sich im Blut lösen kann. Dasselbe gilt für Kohlendioxid in der entgegengesetzten Richtung. Dieser Gasaustausch erfolgt durch Diffusion.

Für die diffundierte O<sub>2</sub>-Menge M (Zahl der Mole) ist

$$M = t \cdot (p_{\text{Gas}}(\text{O}_2) - p_{\text{Blut}}(\text{O}_2)) \cdot K \cdot A / d,$$

wobei t die Diffusionsdauer,  $(p_{\text{O}_2 \text{ Gas}} - p_{\text{O}_2 \text{ Blut}})$  die O<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz zwischen Alveolen und Blut, K die Diffusionsfähigkeit, A die Größe der Austauschfläche und d die Diffusionsstrecke ist. Der Sauerstoff im Blut, der an das Hämoglobin chemisch gebunden ist, trägt zum O<sub>2</sub>-Partialdruck nichts bei.

## **Löslichkeit des Gases (Absorption)**

Wenn sich ein Gas in Berührung mit einer Flüssigkeit bzw. einem Gewebe befindet, löst sich ein Teil des Gases in der Flüssigkeit bzw. in dem Gewebe. An der Grenzfläche zwischen dem Gasraum und der Flüssigkeit findet ein Austausch zwischen den Gas- und Flüssigkeitsmolekülen statt: Die Gasmoleküle dringen in die Flüssigkeit ein, gleichzeitig verläßt ein Teil der Gasmoleküle die Flüssigkeit auch wieder. Der Vorgang setzt sich so lange fort, bis ein Gleichgewicht herrscht. Ein Gleichgewicht besteht dann, wenn die Teilchenströme in die Flüssigkeit hinein und aus der Flüssigkeit heraus gleich groß sind. Die Flüssigkeit ist dann mit Gas gesättigt.

Die Löslichkeit eines Gases hängt von dem Gas und der Flüssigkeit ab (CO<sub>2</sub> ist in Blutplasma z. B. 20 mal löslicher als O<sub>2</sub>), sie ist dem (Partial)Druck proportional und nimmt mit zunehmender Temperatur ab (Henry'sches Gesetz).

## **Strömungswiderstand**

Der Strömungswiderstand R ist im allgemeinen das Verhältnis der Druckdifferenz zur Stromstärke. Bei der Atmung kann man spezifischer die Differenz zwischen Alveolen- und Umgebungsdruck ( $p_a - p_u$ ) und die Atemstromstärke (I) annehmen, so dass der Wegströmungswiderstand  $R = (p_a - p_u)/I$  ist.

Ein großer Teil des Strömungswiderstandes ist im oberen Respirationstrakt zu finden, insbesondere bei Nasenatmung. Bei Einschränkungen (z.B. bei allergischen Anfällen) wird der größte Teil des Atemwegwiderstandes von den Bronchien und Bronchiolen verursacht, wobei dieser auf das 20fache ansteigen kann und eine lebensgefährliche Situation herbeiführen kann. Bei laminarer Strömung ist der Widerstand umgekehrt proportional zur 4. Potenz des Radius und direkt proportional zur Länge eines Rohres. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wird die Strömung in den größeren Luftwegen (z.B. Luftröhre) turbulent und der Strömungswiderstand nimmt zu.

## **Oberflächenspannung und Lungen-Surfactant**

Die Alveolen sind immer mit einer Flüssigkeitsschicht bedeckt. Die Oberflächenspannung  $\sigma$ , der Radius r der Alveole und der Luftdruck p in ihr sind verknüpft durch die Beziehung  $p = 2\sigma/r$ .

Würde die Oberflächenspannung  $\sigma$  in Alveolen verschiedener Größe gleich sein, dann wäre der Druck in kleinen Arteriolen gemäß obiger Beziehung größer als in größeren Arteriolen und Luft würde in die größten Alveolen strömen. (So wie bei zwei miteinander verbundenen Luftballons, wobei der eine erst wenig und der zweite fast ganz aufgeblasen wurde: Der kleinere schrumpft und die Luft fließt in den größeren Ballon). Alveolen kleineren Durchmessers kollabieren aber nicht, denn die Innenwände der Alveolen sind von einer Phosphorlipidschicht (Surfactant) ausgekleidet, die von einigen Zellen der Alveolen ausgeschieden wird und eine Reduzierung der Oberflächenspannung bewirkt. Je kleiner der Alveolendurchmesser

ist, desto größer ist die Reduktion der Oberflächenspannung. Dies führt zu einer größeren Stabilität der Alveolen und zu einem geringeren Risiko des Kollapses.

Bei Neugeborenen ist wegen des sehr kleinen Radius der Alveolen die kollabierende Kraft entsprechend hoch. Ohne ausreichend vorhandene oberflächenaktive Substanz (wie es bei Frühgeborenen oft der Fall ist) erfolgt das Einatmen nur mit enormer Anstrengung. Es besteht daher bei Frühgeborenen die Gefahr, dass sie ohne mechanische Unterstützung zum Tod durch Erschöpfung kommen.

### **Totraum**

Als anatomischen Totraum bezeichnet man das Volumen der Atemwege von der Nase bis zu den Terminalbronchien (ca. 150 ml). Er enthält eingeatmete Luft, die nicht in die Alveolen gelangt, wo der Gasaustausch stattfindet. Der anatomische Totraum hat die Funktion, die durchströmende Luft zu reinigen, zu erwärmen und anzufeuchten.

Bei Ruheatmung verbleibt etwa 1/3 der insgesamt eingeatmeten Luft im Totraum. Die im Totraum verbleibende Luft pendelt immer hin und her und verringert den Anteil an Frischluft. Zum Totraum muss man auch noch belüftete aber nichtdurchblutete Alveolarräume dazurechnen, in denen kein Gasaustausch erfolgen kann. Diese Alveolen treten beim Lungengesunden nur in geringer Anzahl auf.

Bei Verwendung eines Schnorchels vergrößert sich der Totraum um das Volumen des Schnorchels. Aus diesem Grund ist es sinnvoll beim Schnorcheln tiefer zu atmen.

### **Atmungsmechanik und Atemdrücke**

Der Gaswechsel wird durch Vergrößern und Verkleinern des Brustraumes erreicht. Da der Brustkorb hermetisch abgeschlossen ist, führt eine Vergrößerung des Volumens zu einem Druckabfall und eine Verminderung des Volumens zu einer Drucksteigerung in der Lunge.

Beim Einatmen vergrößert sich der Brustumfang, in den Lungen fällt der Druck ab und sauerstoffhaltige Luft fließt über die Atemwege in die Lungenbläschen (Alveolen).

Beim Ausatmen verkleinert sich der Brustumfang, der Druck in den Lungen nimmt zu und Luft wird auf demselben Wege in umgekehrter Richtung abgegeben.

Volumenänderungen kommen hauptsächlich durch das kupelförmige Zwerchfell (sehnig-muskuläre Platte, 3-5 mm Dicke) - dem wichtigsten Muskel für die Atmung - zustande, indem die beiden Kuppeln sich abflachen und das Unterleibsvolumen nach unten vergrößern (Bild 4.3.2).

Gleichzeitig kommen auch andere Muskeln zum Einsatz, die sich durch Heben der Rippen (Drehen an der Wirbelsäule) am Ausweiten des Brustkorbes beteiligen.

Im Gegensatz zum Einatmen erfolgt das ruhige Ausatmen aufgrund der Retraktionskraft der Lunge (im Liegen auch aufgrund der Schwerkraft) weitgehend passiv. Nur bei einer tiefen Atmung oder bei Behinderungen wird beim Ausatmen aktive Muskelarbeit geleistet. Zum Beispiel beteiligen sich

die Bauchmuskeln am Ausatmen, indem sie durch ihre Kontraktionskraft den Bauchhöhleninhalt gegen das Zwerchfell pressen.

Der subatmosphärische Druck (ca. - 0,4 kPa) zwischen Lungen und Brustwand (Pleuraspalt, in dem sich eine dünne Flüssigkeitsschicht (ca. 10 µm) als Schmiere befindet), entsteht wegen der Neigung der Lunge auf Grund ihrer Elastizität zusammenzufallen, und wegen der Neigung des Brustkorbs, sich auszudehnen.

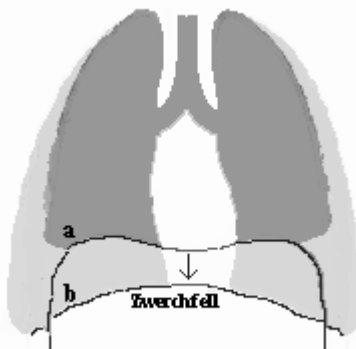


Bild 4.3.2: Während das Zwerchfell sich abflacht (a zu b), vergrößert sich der Brustumfang sowohl nach unten als auch lateral.



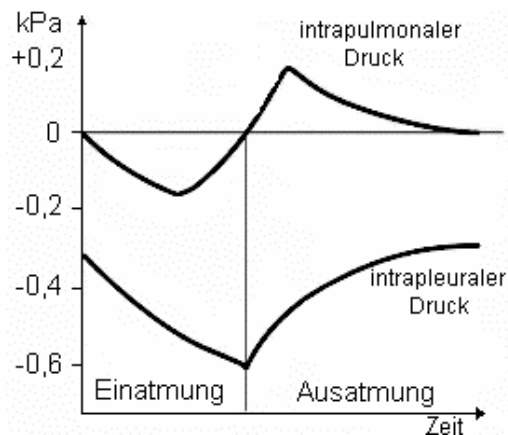


Bild 4.3.3: Druckänderungen in Bezug zum Umgebungsdruck während einer ruhigen Atmung [nach Bartels (1998)].

Der Druck im Lungeninneren kann nicht sehr verschieden vom Umgebungsdruck sein. Besteht ein großer Unterdruck in den Lungen, kann Blut und Flüssigkeit in die Arteriolen eintreten. Bei hohem Überdruck wird die Durchblutung behindert. Außerdem können Arteriolen platzen, auch wenn sie von Gewebe umgeben sind.

In Bild 4.3.3 ist der Verlauf des Drucks in den Lungen (oben) und in dem Pleuraraum (unten) während eines ruhigen Atemzyklus gegeben. Am Ende des Ein- und Ausatmens ist der Druck in den Lungen gleich dem Umgebungsdruck.

Bei schneller Atmung sind die Druckdifferenzen zwischen Umgebung und Innenlungen bzw. Umgebung und Pleuraraum größer. Im Pleuraraum kann ein positiver Druck entstehen.

### Der Husten

Der Husten ist eine Reaktion auf Irritationen der Atemwege durch Fremdkörper, Staub, Schleim oder Viren. Er ist eine Schutzvorrichtung der Atemungsorgane, denn er befreit die Atemwege von Verunreinigungen.

Der Husten beginnt mit einem tiefen Einatmen, damit die Lungen mit Luft gefüllt werden. Dann entspannen sich das Zwerchfell und die anderen Atemmuskeln, der Kehledeckel öffnet sich schlagartig und Luft wird mit so hoher Geschwindigkeit (120-160 km/h, bei ruhiger Atmung kaum 10 km/h) ausgestoßen, so dass sie in den Luftwegen vorhandene Teilchen mit sich reißt [Parramon (1997)].

### Blutkreislaufsystem und Sauerstofftransport

Das sauerstoffarme Blut fließt aus den Körperven zum Herzen in den rechten Vorhof. Es gelangt in die rechte Herzkammer, die es in die Lungenarterie und deren Verzweigungen pumpt. Aus den Lungen kommt das mit Sauerstoff angereicherte und kohlendioxidarme Blut über die Lungenvenen zum linken Vorhof zurück. Vom linken Vorhof strömt das Blut in die linke Herzkammer, die es in den ganzen Körper pumpt. In den Endverzweigungen (Kapillaren) erfolgt der Gasaustausch. Dabei wird Sauerstoff an das Gewebe abgegeben und Kohlendioxid ins Blut aufgenommen. Das jetzt sauerstoffarme, aber  $\text{CO}_2$ -beladene Blut sammelt sich in den Venen, fließt wieder zum rechten Vorhof und der Zyklus beginnt von vorne. Das Blut transportiert Sauerstoff und Kohlendioxid im Kreislauf zwischen Lungen und Körpergewebe. Der Sauerstoff gelangt aus den Alveolen durch Diffusion in die Lungenkapillaren, die die Lungenbläschen wie ein feines Netz umgeben. Dann wird er an das Hämoglobin (ein Eiweiß in den Erythrozyten) chemisch gebunden oder als gelöster Stoff im Blutplasma transportiert. Der Beitrag durch Bindung des Sauerstoffes an das Hämoglobin überwiegt [Duke (1997)]. Beim Sauerstofftransport im Blut durch den Körper gibt das Hämoglobin durch Dissoziation (Aufspaltung) den Sauerstoff an die Zellen des Körpers ab.

Das bei der Zellatmung frei werdende Kohlendioxid wird hauptsächlich als Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) im Plasma transportiert.

### Gasaustausch

Der Gasaustausch kommt zustande, wenn Bereiche verschiedener Konzentration bzw. Partialdrücke aufeinander treffen. Ein solches Druckgefälle besteht auch zwischen den Lungenbläschen und den Blutkapillaren. In den Alveolen der Lungen wird durch Diffusion ein Gleichgewicht zwischen dem  $\text{CO}_2$ -reichen, aber  $\text{O}_2$ -armen Blut und der  $\text{O}_2$ -reichen, aber

CO<sub>2</sub>-armen Luft in den Lungenalveolen angestrebt, d.h. CO<sub>2</sub> wird aus dem Blut abgegeben und O<sub>2</sub> aufgenommen (Äußere Atmung).

Im Körpergewebe (Mitochondrien) erfolgt bei dem engen Kontakt der Erythrozyten ebenso wie in den Lungen ein Ausgleich der unterschiedlichen Konzentrationen von O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>. Jetzt liegt jedoch im Blut die höhere O<sub>2</sub>-Konzentration vor, weshalb O<sub>2</sub> aus dem Blut in die Zelle diffundiert und CO<sub>2</sub> wird über die Blutflüssigkeit wieder zurück zur Lunge befördert (Innere Atmung).

Atemluftzusammensetzung		
	Eingeatmete	Ausgeatmete
	Luft	Luft
N <sub>2</sub> (Stickstoff)	78%	78%
O <sub>2</sub> (Sauerstoff)	21%	17%
CO <sub>2</sub> (Kohlendioxid)	-	4%
Rest (Edelgas)	1%	1%

### Bronchialasthma

Das Bronchialasthma (obstruktiver Atemweg) kann in verschiedenen Formen auftreten und wird durch eine Verengung der Atemwege (Bronchiolen) verursacht [Hierholzer (1991)]. Größere Bedeutung für die Schüler kann das allergische Asthma haben, weil es oft und in der Regel im Kinds- und Jugendalter nach einer Allergenexposition auftritt. Akute Anfälle werden meist durch Inhalation von Substanzen ausgelöst, die mit der Atemluft eingeatmet werden (Pollen, Stäube, Tierhaare u. s.). Sie können durch viele mit der Atemluft eingeatmete Stoffe ausgelöst oder verschlechtert werden, unter diesen Stoffen befindet sich z.B. Tabakrauch, Abgase oder andere chemische Substanzen.

Das Hauptsymptom ist die Atemnot. Das Atmen fällt zunehmend schwerer und wird von Schweißausbruch, Unruhe und Angstzuständen begleitet.

### Embolie

Beim Tauchen mit Pressluftgeräten ist die Luft bzw. spezielle Gasmischung stark komprimiert (z.B. 200 bar). Durch Ventile wird der Druck so reduziert, dass die eingeatmete Luft unter dem gleichen Druck wie die Umgebung steht, der in der jeweiligen Wassertiefe herrscht.

Sauerstoff und Stickstoff werden durch die Luft in das Blut und dann in das Gewebe aufgenommen. Die Gewichtsmengen sind proportional dem Druck (Henry'sches Gesetz). Ein Mensch von 70 kg Körpergewicht bindet in seinem Gewebe je bar Außendruck bei voller Sättigung 1 Liter Stickstoff. Die dem Außendruck entsprechende Sättigung des Körpergewebes mit Stickstoff wird nur langsam erreicht (der eingeatmete Sauerstoff wird von dem Organismus verbraucht), in 30 Minuten bis zur Hälfte, volle Sättigung tritt in 8-10 Stunden ein.

Bei langsamer Druckentlastung wird der Stickstoff durch die Lungen entlüftet. Bei schneller Druckentlastung reicht dieser Entlüftungsmechanismus nicht aus, der Stickstoff bildet im Innern des Blutes Gasblasen, wie sie beim Öffnen einer Mineralwasserflasche zu beobachten sind. Die Gasblasen können zur Verstopfung der Kapillaren in jedem Gefäßgebiet führen. Ist ein lebenswichtiges Organ betroffen (Gehirn, Herz), dann besteht Lebensgefahr.

Auch bei schneller Druckentlastung braucht die Gasabgabe und Gasblasenbildung, insbesondere aus Gewebe und Fett, seine Zeit. Aus diesem Grund sollen nach einem schnellen Aufstieg weitere Höhenanstiege (z. B. Transport durch Hubschrauber) vermieden werden. Hat man ausreichend Zeit für eine Behandlung kann der Taucher wieder unter Druck gestellt werden (in einer Iberbarikkammer) und langsam an den atmosphärischen Druck gewöhnt werden.



## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Ein- und Ausatmen

Anhand von Folien oder Lerntexten (Arbeitsblätter: Die Atmung) werden die Anatomie der Atmungsorgane und der Atmungsvorgang erläutert. Insbesondere wird herausgestellt, dass das Lungengewebe von sich aus (teilweise) kollabieren würde und sich zwischen Brustkorb und Lunge der flüssigkeitsgefüllte Pleuraspalt befindet.

Mit einem einfachen Modell (Bild 4.3.4) wird das Ein- und Ausatmen simuliert.

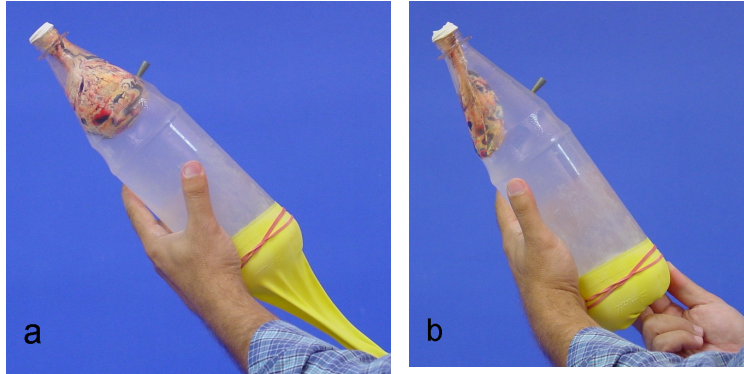


Bild 4.3.4a-b: Simulation des Einatmens durch Erweiterung (a) und des Ausatmens durch Verengung (b) des Brustkorbmodells.

In den Boden einer Plastikflasche schneidet man ein Loch und zieht einen Gummihandschuh über die Flasche, der evtl. noch mit einem Gummiring festgemacht wird. Der Handschuh wird nun nach innen gestülpt, das Modell mit Wasser gefüllt und ein Luftballon in den Flaschenhals gehängt. Damit dieser nicht schwimmt, legt man ein paar kleine Steine o.ä. hinein.

Mit Hilfe dieses Brustmodells wird durch das Verhalten des Luftballons demonstriert, dass die Luft durch Erweiterung des Brustkorbs in die Lunge (Luftballon) fließt, durch Verengung ausgestoßen wird.

Wird der Handschuh aus dem Modell herausgezogen (das würde die in der Realität den nach vorne (*M. intercostales externi*) und nach unten (Zwerchfell) wirkenden Muskeln entsprechen), nimmt das Volumen des Modellbrustkorbs zu (Bild 4.3.4a). Dadurch strömt Luft in den Ballon (Einatmen). Hört der Zug auf (Bild 4.3.4b), so wird das Modellvolumen wieder kleiner und die vorher eingeströmte Luft entweicht (Ausatmen).

Das Wasser im Modell symbolisiert das Gewebe und die Flüssigkeit, die sich im Körper zwischen Brustkorb und Lunge befinden. Die Volumenänderung des Luftballons ist dann erheblich größer und damit die Simulation der Lungenausdehnung sehr viel überzeugender.

Das Modell in Bild 4.3.5 soll einen Brustkorb besser simulieren. Der vordere Teil ist aus Plastik und die Rückwand aus Plexiglas. Beide Teile werden zusammengefügt, indem man ihre Ränder mit einem elastischen Gummiband (Streifen aus einem Autoschlauch) zusammenklebt.

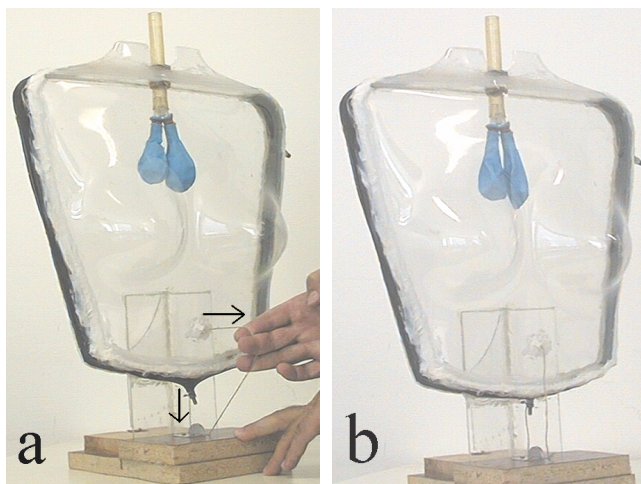


Bild 4.3.5: Brustkorb zur Simulation von Ein- und Ausatmen

Die eingeführte Y-förmige Röhre soll Luftröhre und Bronchien darstellen. Die zwei möglichst weichen Ballons entsprechen den beiden Lungenflügel und die unten angebrachte Gummimembran dem Zwerchfell.

Vorne, im unteren Bereich und gleichzeitig am Gummiband unten wird eine Schnur befestigt. Dadurch können die Muskeln *intercostales externi* und das Zwerchfell getrennt voneinander dargestellt werden. Zieht man an der Schnur vergrößert sich das Volumen (Einatmen, Bild 4.3.5.a), lässt man die Schnur wieder los, verkleinert sich das Volumen (Ausatmen, Bild 4.3.5.b).

Beim Bau eines solchen, der Realität ähnlicheren Modells treten Schwierigkeiten auf. Ist das Gummiband zu weich, wird es vom äußeren Luftdruck nach innen gedrückt. Auch ist es nicht ganz einfach die Klebefugen dicht zu bekommen.

Die folgenden Fragen können zum Abschluss diskutiert werden:

- 1) Erfolgt ein gewisser Teil der Atmung ohne Aktivierung der Atemmuskeln oder des Zwerchfells?
- 2) Findet Atmung statt, wenn z.B. durch einen Unfall ein Loch im Brustkorb entsteht?

Antworten

- 1) Nein, weil ohne Muskelzug kein Einatmen (aktive Phase) stattfinden kann.
- 2) In dem Lungenflügel auf der betroffenen Seite findet keine Atmung statt, in dem anderen Lungenflügel schon.

## 2. Das Atmen unter Wasser

Der Luftdruck wird in Analogie zum Schweredruck des Wassers als Schweredruck eingeführt. Zunächst kann angesprochen werden, dass beim Bergsteigen das Atmen mit zunehmender Höhe schwerer fällt und dass durch die Druckabnahme mit wachsender Höhe sich pro Volumeneinheit weniger Sauerstoffmoleküle in der Luft befinden. Dadurch kann der Fall eintreten, dass der Körper nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird. Stellt man nun die Frage, welche Besonderheiten sich für die Atmung in der Tiefe unter Wasser ergeben, wird klar, dass zunächst die Eigenschaften der umgebenden Flüssigkeit bekannt sein müssen.

Man führt den Schweredruck des Wassers ein. Als erstes wird dann geklärt, dass unter Wasser von außen auf den Brustkorb auf jeden Fall ein höherer Druck lastet als außerhalb des Wassers. Atmet ein Taucher unter Wasser aus einer Gasflasche, muss der Atemluftdruck dem Druck des umgebenden Wassers angepasst werden. Dies geschieht durch den sogenannten Lungenautomaten (Bild 4.3.6). Ist der Druck im Wasser größer als im Gehäuse, so wird die Membran nach innen gedrückt. Die Hebel sorgen dafür, dass das Ventil geöffnet wird, so dass Luft aus der Flasche nachströmen kann. Sobald ein Druckgleichgewicht herrscht schließt das Ventil die Luftzufuhr aus der Flasche ab. Beim Einatmen sinkt der Druck im Gehäuse, das

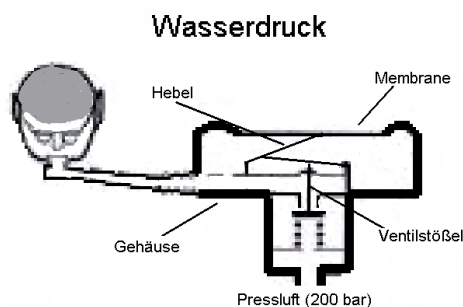


Bild 4.3.6: Schematischer Aufbau des Lungenautomaten zur Anpassung des Drucks aus der Pressluftflasche an den Umgebungsdruck des Wassers.

Ventil wird geöffnet und Luft strömt nach. Atmet der Taucher aus, so entsteht ein Überdruck, der durch ein Ventil im Mundstück ausgeglichen wird. Bei modernen Taucherausrüstungen wird der Druck aus der Flasche, der bei einer frisch gefüllten Flasche ca. 200 bar beträgt, durch zwei Ventile an den Umgebungsdruck angepasst. Das erste Ventil befindet sich am Ausgang der Flasche und reduziert den Druck auf ca. 6 – 14 bar, das zweite Ventil im Mundstück gleicht den Druck an den Umgebungsdruck an.

Die Arbeitsblätter „Überblick über unterschiedliche Umgebungsdrücke“ bieten eine Übersicht über verschiedene Umgebungsdrücke.

## 3. Lungenriss bei Panikaufstieg

Wenn ein Taucher in Panik gerät, kann es passieren, dass er zu schnell nach oben flüchtet und dabei auch noch zwanghaft die Luft anhält. Die angehaltene und komprimierte Luft in den Lungen dehnt sich aus und kann schon ab 0,1 bar Überdruck zu einer Überdehnung und sogar zu einem Riss des Lungengewebes führen. Die Gefahr von Geweberissen ist überall dort gegeben, wo komprimierte Gasblasen im Körper vorhanden sind, deren Volumen bei Druckan-

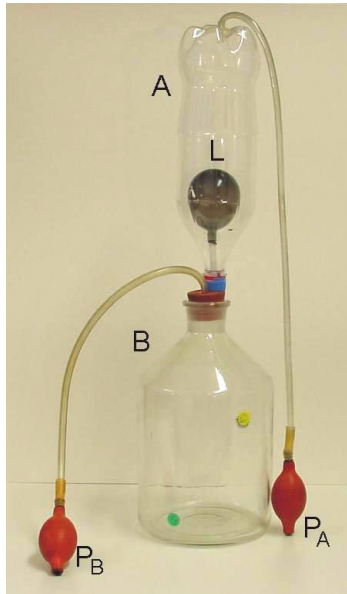


Bild 4.3.7: Bei Verminderung des Druckes im Behälter A und Beibehaltung des Druckes in B (Aufstieg ohne Atmen) reißt der Luftballon (Lunge)

stiegen nicht konstant gehalten werden kann. Bei Überdehnung kann Luft in die Kapillaren eindringen und zur Embolie führen. Beim Riss des Lungengewebes kann Luft in den Pleuraspalt eindringen und zum Pneumothorax führen (die Lungenflügel kollabieren; siehe Schritt 4).

Das Zerreißen des Lungengewebes kann durch folgende Anordnung simuliert werden. Ein aufgeblasener Luftballon, der die Lunge darstellen soll, befindet sich in einem fast vollständig mit Wasser gefüllten Behälter (A), in dem ein Überdruck herrscht (Bild 4.3.7). Durch die Pumpen  $P_A$  bzw.  $P_B$  wird der Druck in den Behältern A bzw. B erhöht. Das Versuchssystem stellt einen Taucher in der Tiefe dar, wobei ein Überdruck sowohl in dem umgebenden Wasser als auch in der Luft der Lungen (Luftballon) herrscht. Wenn nun die komprimierte Luft vom Behälter A abgelassen wird (der Wasserscheredruck verringert sich durch den Aufstieg), vergrößert sich der Luftballon L und er platzt, wenn der Druck im Behälter B genügend groß ist. Das Volumen des Behälters B spielt eine wichtige Rolle: Je größer das Volumen in B ist, desto kleiner ist der nötige Druck, um den Luftballon zum Platzen zu bringen. Das Volumen B stellt den Totraum dar. Das ist jenes Luftvolumen, das beim Ausatmen nicht ausgestoßen wird.

Trotz des Nachteils, dass die Volumenverhältnisse nicht der Realität entsprechen, ist der Modellversuch recht nützlich.

#### 4. Pneumothorax

Wenn Luft aus den Lungen oder durch die Brustwand in den Pleuraspalt eindringt (Lungenriss bei Panikaufstieg, Lungenentzündung, Brustperforation bei Unfällen, Operationen usw.), steigt der Intrapleuraldruck (dieser ist normalerweise immer kleiner als der Atmosphärendruck) und die Alveolen fallen zusammen (kollabieren). Da die Lungen räumlich getrennt sind, kann nur ein „Flügel“ kollabieren. In leichten Fällen kann eine spontane Heilung eintreten. In schweren Fällen muss die Luft aus dem Pleuraspalt abgesaugt werden.

Um den Ablauf eines Pneumothoraxes zu simulieren, benutzt man ein Modell, wie es zur Demonstration der Vorgänge beim Ein- und Ausatmen verwendet wurde (vgl. Bild 4.3.4). Auf Höhe des Luftballons ist in die Flasche ein zusätzliches Loch gebohrt.

Man drückt den Handschuh in die Flasche und schließt das Loch mit einem passenden Stöpsel. Zieht man nun den Handschuh heraus, so entsteht im Modell ein Unterdruck, der Ballon bläst sich auf (das Einatmen ist möglich). Dann öffnet man wieder den Luftweg zum Inneren des Modells. Luft wird in das Modell eintreten (dies entspricht dem Eintreten von Luft in den Pleuraspalt), wobei der Druck atmosphärisch wird und der Ballon zusammenfällt. Das Aufblasen (Einatmen) ist nicht mehr möglich.

#### 5. Maximaler Atemdruck

Eine grobe Abschätzung der beim Aus- und Einatmen erreichbaren Druckdifferenzen kann durch ein U-Rohr-Manometer erfolgen. In einen etwa 3 m langen, dünnen und u-förmig gehaltenen Schlauch wird Wasser eingefüllt (etwa eine Wassersäule von 1 m bis 1,5 m) und wie in Bild 4.3.8 gegen diese Säule ein- bzw. ausgeatmet. Einem Abstand der beiden Oberflächen der Wassersäule von 1 m entspricht eine Druckdifferenz von 10 kPa. Beim Ausatmen kann bei trainierten Sportlern ein Druck von 15 kPa erreicht werden, beim Einatmen gibt eine maximale Anstrengung Werte um  $-10$  kPa. Diese Zahlen sind ein Maß für die Kraftentfaltung

der Muskeln und sie zeigen, dass schon bei 100 cm Wassertiefe das Atmen sehr anstrengend wird.

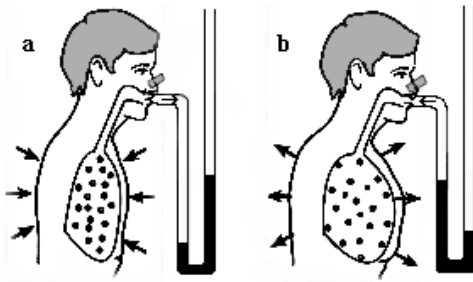


Bild 4.3.8a-b: Messung durch den geschlossenen Atemweg mit maximalem Atemdruck beim Ausatmen (a) und beim Einatmen (b).

## 6. Verlängerung eines Schnorchels

Nach der Erfahrung, wie schwierig es ist, gegen eine 1 – 1,5 m hohe Wassersäule zu atmen, kann jetzt die Frage diskutiert werden, warum man nicht einfach mit einem mehreren Meter langen Schnorchel taucht.

Bild 4.3.9 verdeutlicht die Situation. Der Schweredruck im Wasser ist bei 1m Tiefe gleich 10 kPa, das ist etwa 1/10 des Luftdrucks.

Wegen der Schnorchelverbindung bleibt im Lungeninnenraum der Druck atmosphärisch (ca. 1 bar). Hingegen ist der Druck, der in der Tiefe wirkt, ca. 1,1 bar:

- Die Atmung wird beeinträchtigt, denn der Schweredruck unter Wasser ist so groß, dass die Atemmuskeln den Brustkorb nicht einfach ausdehnen können.
- Obwohl die Druckdifferenz nur 0,1 bar beträgt, können Gewebeflüssigkeit und Blut aus den Lungenkapillaren in die Alveolen austreten. Das bringt die Gefahr des Erstickens mit sich.
- Eine weitere Gefahr birgt die Pendelatmung. Die Luft im Schnorchel wird mehrfach ein- und ausgeatmet und so findet kein Luftaustausch statt, was eine Kohlendioxidvergiftung zur Folge hat.

Deswegen besitzen Schnorchel ein relativ dünnes Rohr (weniger als 2,5 cm) und eine maximale Länge von etwa 40 cm. (Sehr dünne Schnorchel besitzen ein kleines Volumen aber erhöhen den Strömungswiderstand).

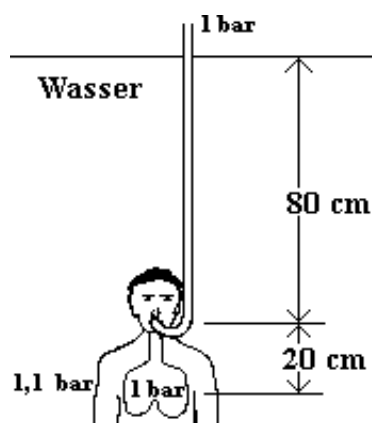


Bild 4.3.9: Druckdifferenz zwischen Lungeninnerem und Umgebung beim Atmen unter Wasser durch einen langen Schnorchel

## Arbeitsblätter: Die Atmung

In Bild 1 kannst du den Aufbau der Atmungsorgane sehen.

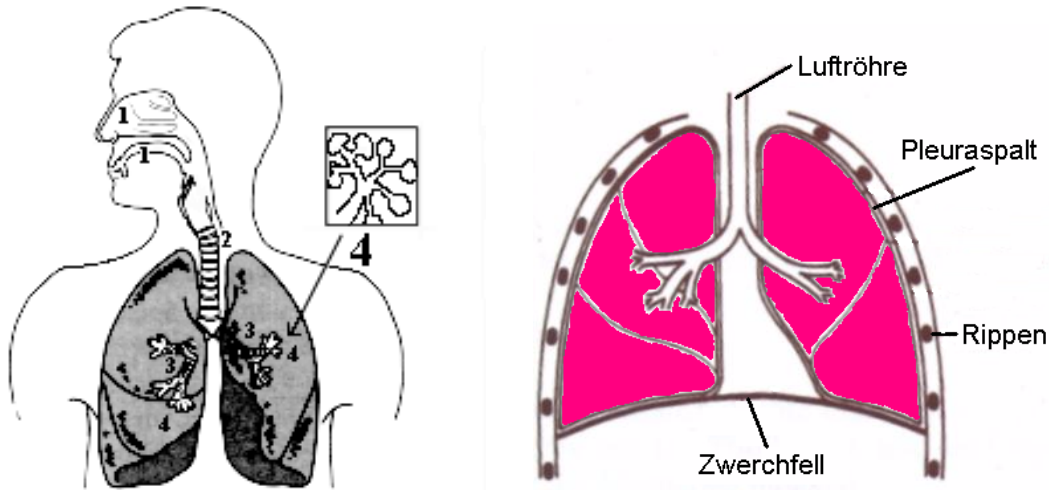


Bild 1: Die Luft bewegt sich durch Nasenhöhle bzw. Mund (1), Luftröhre (2), Bronchien und Bronchiolen (3) und verteilt sich dann auf die immer feineren Verzweigungen bis in die Alveolen (4), wo der Gasaustausch stattfindet. Im Feld ist die Vergrößerung eines Endgliedes der Luftröhren dargestellt, an dem die Alveolen hängen.

Die Atmung erfolgt durch Erweitern und Verengen des Brustkorbs mit Hilfe von Muskeln, die an den Rippen angreifen und diese heben und senken. Durch diese Volumenänderungen werden unterschiedliche Druckdifferenzen zwischen dem Luftdruck außerhalb und innerhalb des Brustraumes hergestellt (Bild 2).

Zwischen Lunge und Brustkorb befindet sich eine sehr dünne Flüssigkeitsschicht im Pleuraspalt, so dass Lunge und Brustkorb bei den Atembewegungen leicht aneinander vorbeigleiten können. Da sich die Flüssigkeit nicht ausdehnt, wird die Lunge bei Ausdehnung des Brustkorbes mit vergrößert.

Neben der Verkleinerung und Vergrößerung des Brustkorbs spielt die Bewegung des Zwerchfells eine wichtige Rolle. Das Zwerchfell ist eine sehnig-muskulöse Platte, die den Brustraum nach unten gegen den Bauchraum abschließt. Bei Anspannung flacht sich das Zwerchfell nach unten ab und vergrößert dadurch den Brustraum und damit die Lungen.



### Einatmen

Während sich die Atemmuskeln und das Zwerchfell anspannen, erweitert sich der Brustkorb:

- Im Brustkorb wird ein im Vergleich zum äußeren Luftdruck noch größerer Unterdruck hergestellt
- Die Lungen folgen der Erweiterung des Brustkorbs
- In den Lungen entsteht ein Unterdruck
- Luft strömt von außen in die Lungen

### Ausatmen

Während die Atemmuskeln und das Zwerchfell sich entspannen, verengt sich der Brustkorb:

- Im Brustkorb verkleinert sich der Unterdruck
- Die Lungen ziehen sich zusammen
- In den Lungen entsteht ein Überdruck
- Die verbrauchte Luft wird aus den Lungen ausgestoßen

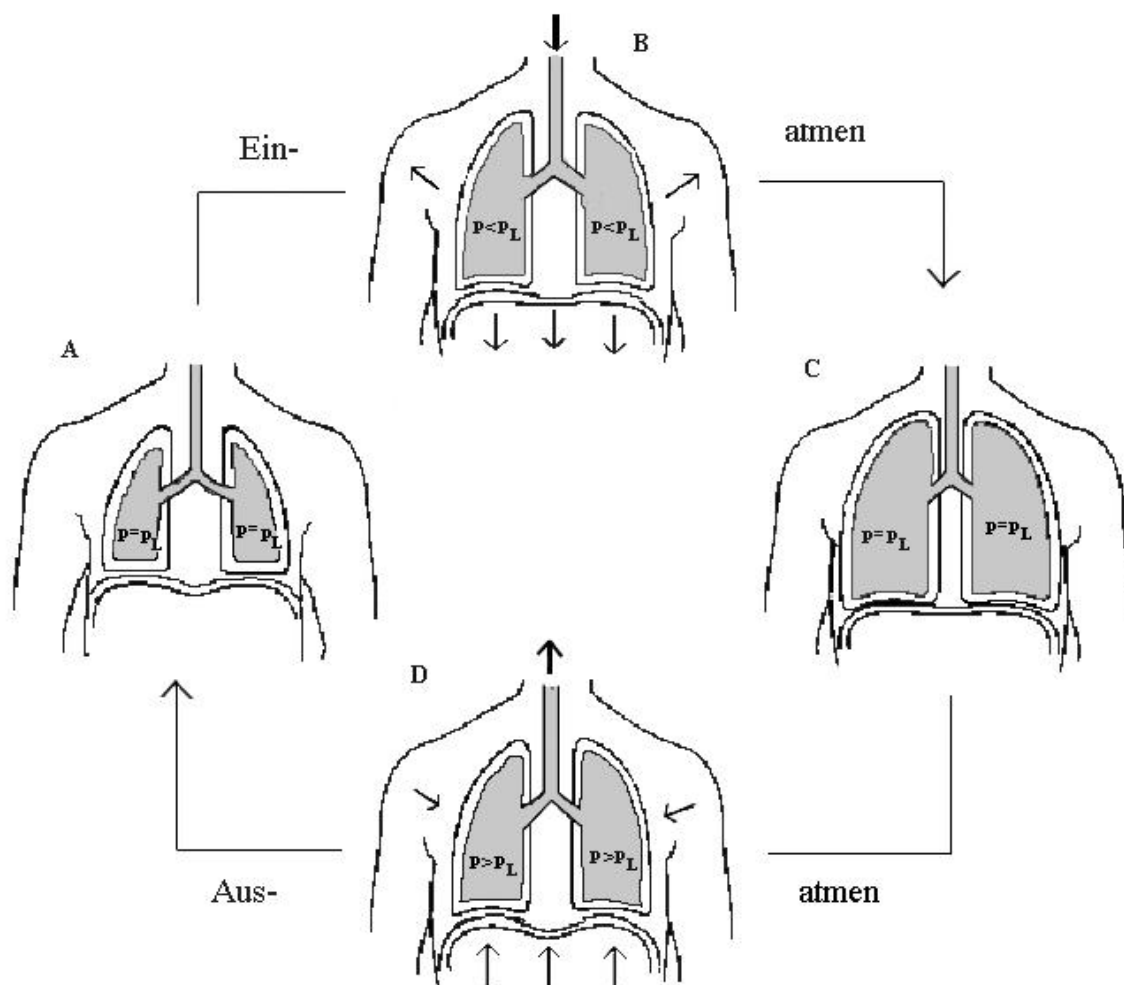
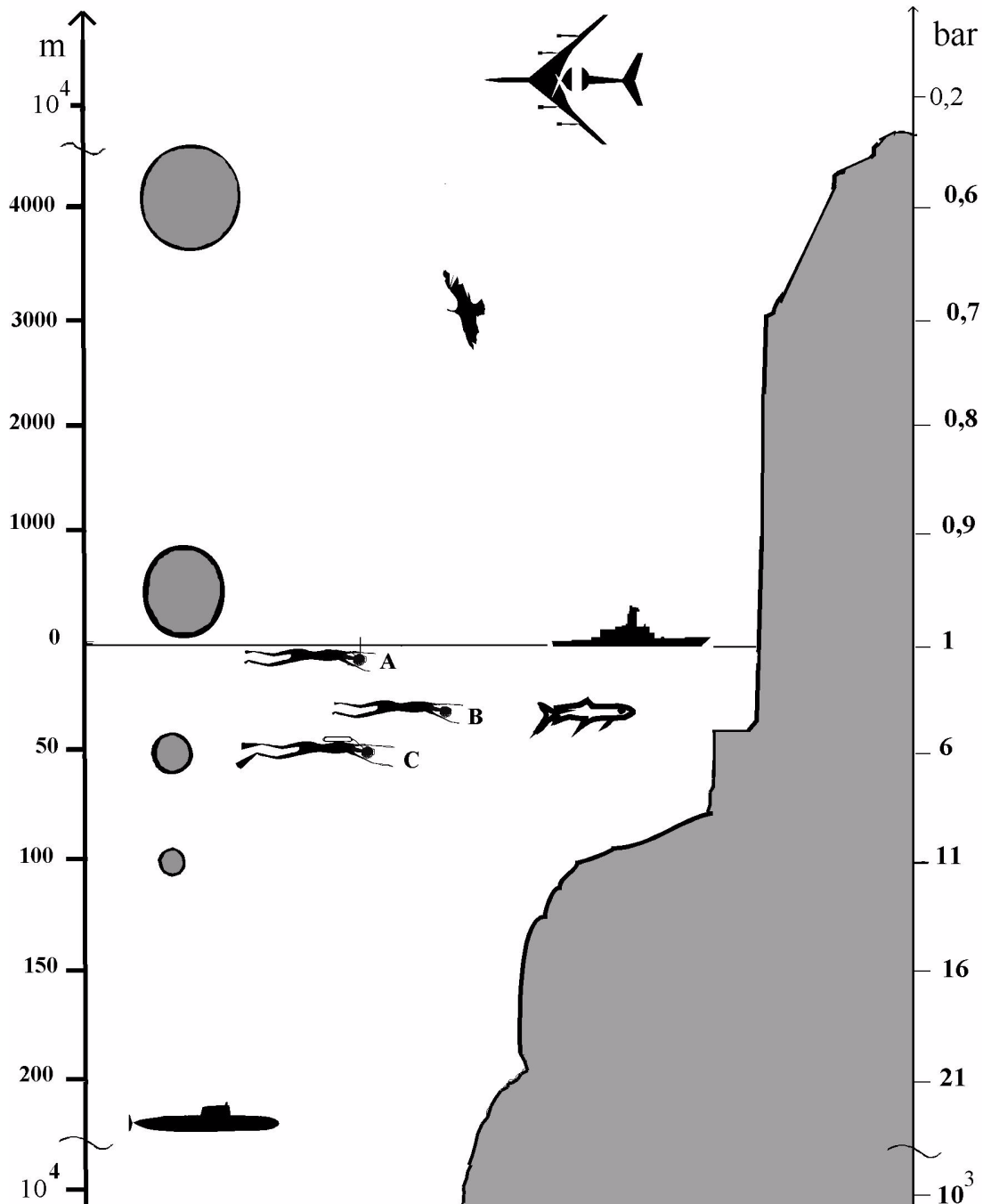


Bild 2: Beim Einatmen (A zu C über B) vergrößert sich der Brustkorb und Luft strömt von außen in die Lunge. Beim Ausatmen (C zu A über D) verkleinert sich der Brustkorb und Luft strömt aus der Lunge heraus.  $p_L$  ist der äußere Luftdruck.

## Arbeitsblätter: Überblick über unterschiedliche Umgebungsdrücke

In jeder Luftschicht um die Erde wirkt ein Druck, der durch das Gewicht der darüberliegenden Luftschichten gegeben ist. Deswegen nimmt der Druck mit zunehmender Höhe ab. Im Wasser nimmt der Druck mit größerer Tiefe schneller zu als in der Luft, weil die Dichte des Wassers größer als die der Luft ist.



Die Abbildung enthält „Objekte“, auf die unterschiedliche Umgebungsdrücke wirken. Achte darauf, dass der Maßstab über und unter der Wasseroberfläche verschieden ist. Auf der rechten Seite ist der jeweilige Druck angegeben. Auf der linken Seite des Bildes ist ein Luftballon dargestellt, dessen Volumen sich aufgrund der unterschiedlichen Umgebungsdrücke ändert.

Das Körpergewebe ist weich, deswegen sollen große Druckunterschiede im Körper vermieden werden. Sonst können Dehnungen, Durchblutungsstörungen usw. auftreten. Beim Atmen muss daher der Druck der Atemluft ungefähr gleich demjenigen Druck sein, der von außen auf den Körper wirkt.

Fülle mit Hilfe der Abbildung die folgende Tabelle aus:

Objekt	Umgebungsdruck in bar	Druck auf das Objekt in bar	Atemluftdruck in bar
Flugzeugpassagiere	0,2 (außer der Kabine)	0,8	0,8
Adler			
Schnorchelschwimmer (A)			
Apnoetaucher* (B)			--
Hai			--
Caissonarbeiter ** (zeichne das Objekt im Bild ein)		5	5
Froschmann (C)			
U-Bootfahrer im U-Boot			
* Apnoetaucher: Taucher ohne Atemgerät (Apnoe = Atempause)			
** Caissonarbeiter arbeiten unter einer Taucherglocke. Drücke einen Glasbehälter im Wasser mit der Öffnung nach unten, dann wird dir das Prinzip der Taucherglocke klar sein.			

Ausgefüllte Tabelle:

Objekt	Umgebungsdruck in bar	Druck auf dem Objekt in bar	Atemluftdruck in bar
Flugzeugpassagiere	0,2 (außer der Kabine)	0,8	0,8
Adler	0,7	0,7	0,7
Schnorchelschwimmer (A)	1,02	1,02	1
Apnoetaucher (B)	3	3	*
Hai	3	3	--
Caissonarbeiter	5	5	5
Froschmann (C)	6	6	6
U-Bootfahrer	20 (außer der Kabine)	1	1
* Der Druck der Luft in den Lungen beträgt wegen der Verengung des Innenbrustvolumens mehr als 1 bar, und hängt von der Tiefe ab.			



### Fragen zur Übung und Vertiefung:

- 1) Warum spüren wir den atmosphärischen Druck nicht?
- 2) Ein Flugzeug fliegt in großer Höhe. Plötzlich geht eine Tür auf. Verlässt Luft die Kabine oder tritt Luft von außen ein?
- 3) Ein U-Boot ist untergetaucht. Wird bei Undichte Wasser eintreten oder Luft den Schiffsrumpf verlassen?
- 4) Soll ein absteigender Taucher Luft in die Taucherbrille durch die Nase einblasen oder soll Luft aus der Taucherbrille entlassen werden.
- 5) Vergrößern sich die Lungen der Passagiere bei einem schlagartigen Abfall des Kabinendrucks im Flugzeug?
- 6) Ist die Lungengröße in Apnea (ohne atmen) unter Wasser größer, kleiner oder gleich der Lungengröße an der Wasseroberfläche?
- 7) Ist das Lungenvolumen unter Wasser bei druckgeregelter Atmung größer, kleiner oder gleich groß als an der Oberfläche?
- 8) Warum ist es leichter mit geöffnetem Mund zu atmen?
- 9) Welchen Vorteil hat es durch die Nase zu atmen?
- 10) Ein Taucher atmet je nach der Tauchtiefe mehr oder weniger komprimierte Luft. Wenn bei 30 m Tiefe seine Lungen mit 6 l Luft gefüllt sind und er, ohne auszuatmen, an die Oberfläche steigt, welches Volumen würde dann die in den Lungen befindliche Luft haben?

### Antworten:

- 1) Weil innerhalb und außerhalb unseres Körpers der Druck gleich groß ist.
- 2) In großer Höhe ist der Druck geringer als derjenige, der im Flugzeug gehalten wird. Daher strömt Luft aus der Kabine.
- 3) Der Wasserdruck in der Tiefe ist viel größer als derjenige, der im U-Boot gehalten wird. Auch bei einer geringen Undichte tritt daher Wasser in das U-Boot ein.
- 4) Wenn die Taucherbrille nicht elastisch ist, muss der Taucher Luft hineinblasen, damit der Druck in der Brille dem äußeren Druck entspricht. Sonst tritt entweder Wasser in die Taucherbrille ein, oder es können wegen des Unterdrucks in der Taucherbrille Augenskapillaren platzen. Wenn der Taucher wieder aufsteigt, soll Luft aus der Brille entweichen.
- 5) Mit Ausnahme der ersten Sekunden, vergrößern sich die Lungen der Passagiere nicht, denn der Druckabfall betrifft sowohl den Brustkorb als auch die Innenlungen der Passagiere. Hingegen kann sich das im Darm eingeschlossene Gasvolumen enorm vergrößern, mit einer bedingten Verlagerung des Zwerchfells nach oben, die zu einer Einschränkung der Atmung führen kann.
- 6) Unter Wasser in Apnea sind die Lungen kleiner als an der Oberfläche, denn der Schweredruck des Wassers komprimiert den ganzen Körper, auch der Bauch wird zusammengedrückt und bewirkt dadurch eine Anhebung des Zwerchfelles.
- 7) Das Lungenvolumen ist unter Wasser bei druckgeregelter Atmung gleich groß, wenn die Druckdifferenz zwischen Innenlungen und Umgebung gleich groß gehalten wird.
- 8) Mit geöffnetem Mund fließt Luft entlang eines kurzen Weges und durch einen großen Durchmesser, daher ist der Wegwiderstand niedriger.
- 9) Der Vorteil ist, dass die Luft durch die Nase besser erwärmt und befeuchtet wird.
- 10) Das Volumen ist indirekt proportional zum Druck. Wenn der Druck von 4 bar (3 bar für 30 m Wassertiefe + 1 bar Oberflächendruck) auf 1 bar fällt, würde das Volumen von 6 l auf  $(6 \cdot 4) \text{ l} = 24 \text{ l}$  steigen.

## 4.4 Das Auge<sup>1</sup>

Es ist üblich, dass im Optikunterricht der Mittelstufe Aufbau und Funktion des menschlichen Auges behandelt werden. Da Sehschwächen oft schon bei Schülern auftreten, ist es sicher auch für die Schüler interessant im Unterricht zu erfahren, wie Fehler bei der Abbildung auf der Netzhaut entstehen.

Für das Sehen ist die Netzhaut von besonderer Bedeutung. Wie kann der Augenarzt die Netzhaut untersuchen, genauer: Wie kann er gleichzeitig die Netzhaut beleuchten und, ohne die Beleuchtung zu stören, in das Auge hineinschauen? Wie kann außerdem der Augenarzt die Fehlsichtigkeiten bestimmen?

Vielen Schülerinnen und Schülern ist vom Schwimmen und Tauchen bekannt, dass man unter Wasser ohne Taucherbrille nicht so gut sehen kann, auch wenn das Wasser sehr klar ist. Warum sieht man verschwommen? Sehen Fische und andere im Wasser lebende Tiere ihre Umgebung ebenfalls verschwommen? Akkommodieren sie auf die gleiche Weise wie wir, durch Verändern der Linsendicke? Wie ist es mit Tieren, die sowohl im Wasser als auch außerhalb scharf sehen sollten?

Fragen dieser Art stoßen im Physikunterricht auf größeres Interesse und werden deshalb als Kontext in den folgenden 4 Einheiten benutzt. Fehlsichtigkeiten und Akkommodation werden weniger, wie üblicherweise, durch theoretische Betrachtungen anhand von Abbildungen beschrieben, sondern durch sehr einfache Demonstrationsmodelle erklärt.

### Basiswissen über das Auge

#### Das Auge als optisches Instrument

Das Auge ist der periphere Teil des Lichtsinnesorgans. Das Sehen beginnt mit der Abbildung auf der Netzhaut. Die durch das Licht übertragenen Informationen werden auf der Netzhaut in elektrische Impulse umgewandelt und über Nervenbahnen an das Gehirn weitergeleitet, analysiert und interpretiert.

Das Auge ist eine Kugel von ca. 24 mm Durchmesser und besteht aus (Bild 4.4.1):

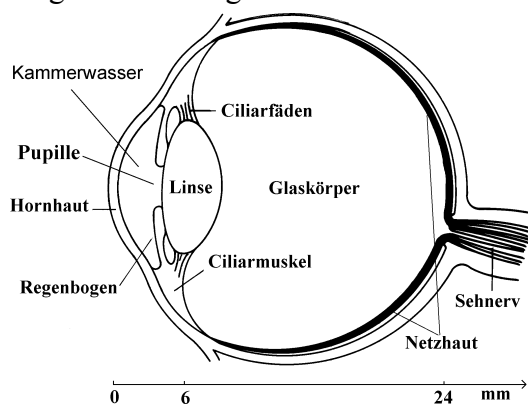


Bild 4.4.1: Aufbau des menschlichen Auges

- der vorderen Hornhaut ( $n = 1,376$ ), die knapp einen Millimeter dick ist, keine eigene Blutversorgung besitzt und völlig durchsichtig ist,
- der Augenkammer, die eine Flüssigkeit (Kammerwasser,  $n = 1,336$ ) enthält,
- der Regenbogenhaut, in deren Mitte sich ein kreisrundes Loch befindet (Pupille),
- der elastischen Linse ( $n$  von 1,385 an den Polen bis 1,406 im Kern; Dicke 4-5 mm und Durchmesser 6-9 mm),
- dem Glaskörper ( $n = 1,336$ ), der den Augapfelraum ausfüllt,
- der Netzhaut (Retina), die die hintere innere Oberfläche des Auges auskleidet.

Das sichtbare Licht muss, um die Netzhaut reizen zu können, den optischen Apparat des Auges durchlaufen. Das Licht tritt durch das vordere Auge ein und wird dort gebrochen. Die Brechkraft kann durch verschiedene Faktoren verändert werden: zum Teil durch die Kraft der

<sup>1</sup> Teile der Einheiten wurden bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (2000c und 2000d); Colicchia u. a. (2001b)].

äußeren Muskeln, die zu einer ellipsoiden Deformierung der ganzen Augenkugel, d.h. auch der Hornhaut, führen kann, vor allem aber durch die unterschiedliche Krümmung der Linsen durch die Ciliarmuskeln (Akkommodation).

Die äußere Oberfläche der Hornhaut trägt wegen ihres Überganges zur Luft den wesentlichsten Teil zum Brechwert des Auges bei, etwas mehr als 40 dpt. Die Linsenbrechkraft beträgt nur ca. 15-25 dpt (je nach Akkommodationszustand). Da der Abstand der Linse von der Hornhaut (ca. 7 mm) gering ist, führt eine bloße Addition dieser Dioptriezahl zu jener der Hornhaut zu einer akzeptablen Näherung.

Das menschliche Auge stellt ein kompliziertes optisches System dar, weil viele Teile des Augapfels mit verschiedenen Brechungsindizes zur optischen Abbildung beitragen. Es wird daher ein vereinfachtes Modell eingesetzt (das „reduzierte Auge“), bei dem das Augeninnere

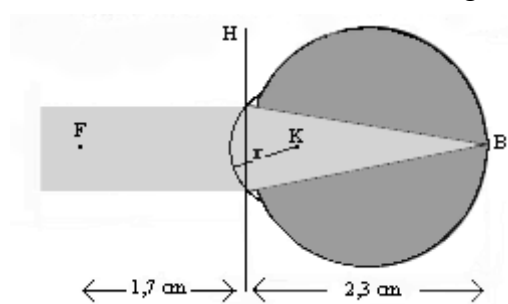


Bild 4.4.2: Reduziertes Auge, wobei die Brechung an einer einzelnen Fläche gedacht wird. H Hauptebene, K Knotenpunkt, F und B vorderer und hinterer Brennpunkt

mit Wasser gefüllt angenommen wird und man sich die Gesamtbrechung des Auges an einer einzigen brechenden Fläche entstanden denkt (Bild 4.4.2). Man wählt im „reduzierten Auge“ einen kleineren Krümmungsradius ( $r = 6 \text{ mm}$ ) als beim natürlichen Auge (ca.  $8 \text{ mm}$ ), damit die gleiche Brechung wie beim Auge bewirkt wird. Die Länge des reduzierten Auges beträgt wie beim natürlichen Auge  $24 \text{ mm}$ , die Brechung ca.  $58 \text{ dpt}$ , die gegenstandsseitige Brennweite  $17 \text{ mm}$  und die bildseitige  $23 \text{ mm}$ . Die Unterschiede zwischen vorderer und hinterer Brennweite ergeben sich aus den Unterschieden im Brechungsindex von Luft und Wasser.

### Abbildung durch einfache Brechung

Wir betrachten einen leuchtenden Gegenstand Y in einem Medium  $M_1$  und ein anderes Medium  $M_2$ , das sich von  $M_1$  kugelförmig abgrenzt (Bild 4.4.3). Wenn die Brechzahl des Mediums  $M_2$  größer ist als diejenige des Mediums  $M_1$  ( $n_2 > n_1$ ), entsteht in dem Medium  $M_2$  ein reelles Bild  $Y'$ .

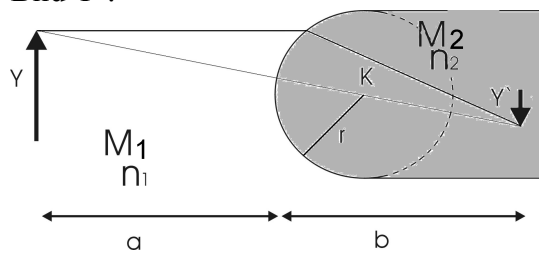


Bild 4.4.3: Abbildung durch eine brechende Fläche. g Gegenstandsweite, b Bildweite, K Knotenpunkt

Wenn die Lichtbündel nicht groß sind, gilt die Abbildungsgleichung

$$n_1/a + n_2/b = (n_2 - n_1)/r,$$

wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungszahlen,  $a$  und  $b$  die Entfernungen des Objekts und des Brennpunkts von der Kurvenspitze und  $r$  der Radius ist.

Die Bild- und die gegenstandsseitige Brennweite,  $f_1$  und  $f_2$ , resultieren aus der Gleichung für  $a = \infty$  und  $b = \infty$ :

$$f_1 = r \cdot n_2 / (n_2 - n_1)$$

$$f_2 = r \cdot n_1 / (n_2 - n_1)$$

Je größer der Unterschied der Brechungsindizes oder je stärker die brechenden Oberfläche gekrümmt ist, desto näher an der Brechungsfläche wird das Objekt abgebildet.

Je näher der Gegenstand vom Unendlichen zu der brechenden Oberfläche hin verschoben wird, desto weiter entfernt wird er abgebildet, solange bis der Gegenstand den linken Brennpunkt erreicht hat. Danach wird kein Bild mehr aufgefangen. Für den Abbildungsmaßstab  $B'$  gilt:  $B' = Y'/Y = (n_1/n_2) (b/a)$ .

Soll das Bild eines weit entfernten Gegenstandes, der sich in Luft befindet, auf der Kugeloberfläche im Inneren von Medium 2 liegen (d. h.  $f_1 = 2r$ ), muss der Brechungsindex  $n_2 = 2$  sein, und das unabhängig von dem Radius  $r$ . Bei einer mit Wasser ( $n = 1,33$ ) gefüllten Kugel, braucht man eine zusätzliche Brechkraft. Das kann durch eine stärkere Krümmung der Kugel

oder eine zusätzliche, brechende Fläche bzw. Linse, die einen genügend kleinen Krümmungsradius besitzt, erreicht werden. Sollen außerdem Gegenstände aus unterschiedlichen Entfernungen betrachtet und scharf abgebildet werden, muss die Linse ihre Stärke variieren können (akkommodierende Linse, wie beim menschlichen Auge).

Auf der Netzhaut entsteht ein verkehrtes Bild. Die zentrale Verarbeitung der äußeren Sinneseindrücke und ein Lernvorgang in frühester Jugend lassen uns das Bild aufrecht erscheinen. Bei Versuchspersonen mit Brillen, die das Bild umdrehen, steht die Welt zunächst auf dem Kopf, aber nach einigen Tagen lernt der Mensch die Informationen so zu verarbeiten, dass er seine Umwelt wieder aufrecht sieht.

### **Akkommodationsformen**

Es gibt im wesentlichen zwei Grundformen, mit denen eine Akkommodation auf unterschiedlich weit entfernte Gegenstände erreicht werden kann:

(a) Durch Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut bei starrer, nicht formveränderbarer Linse.

(b) Durch die Krümmung der formveränderbaren Linse;

Fische, die in der Regel eine starre, nicht formveränderbare Linse besitzen, akkommodieren wie in (a).

Vögel, Säugetiere und die meisten Reptilien akkommodieren wie in (b), wobei bei Vögeln an der Akkommodation zusätzlich auch eine Änderung der Hornhautkrümmung beteiligt sein kann (z. B. kann bei Tauben durch zusätzliche Krümmung der Hornhaut eine Änderung der Brechkraft von bis zu 17 dpt erreicht werden). Es gibt auch Sonderfälle (z. B. eine für Nah- bzw. Fernsehen doppelte Netzhaut), so dass keine lückenlose Weiterentwicklung der Augen im Tierreich besteht. Von den niederen Tieren über die Fische, Amphibien, Reptilien und Vögel zum Säugetier sind alle verschiedenen Akkommodationsvorgänge anzutreffen.

### **Akkommodation des menschlichen Auges**

Bei völliger Entspannung ist das Auge auf die Ferne scharf gestellt. Werden nähere Objekte angeschaut, dann werden die Grenzflächen der Linse durch Kontraktion der Ciliarmuskeln (Ringmuskeln) gewölbt. Der Durchmesser des Ciliarmuskels wird kleiner, der Zug der Ciliarfäden auf die Linse wird schwächer, so dass sich die elastische Linse verdicken kann, wodurch sich der Brechwert vergrößert.

Als Fernpunkt  $D_f$  bezeichnet man den am weitesten entfernten Ort auf der Augenachse, der ohne Akkommodation scharf gesehen wird. Als Nahpunkt  $D_n$  den Ort auf der Augenachse, der bei stärkster Akkommodation scharf gesehen wird (25 cm in mittlerem bis 10 cm in jungendlichem Lebensalter).

Die Akkommodationsbreite  $A_B$  ist der Betrag, um den die Brechkraft der Linse geändert werden kann:  $A_B = 1/D_n - 1/D_f$  (in  $m^{-1}$  bzw. Dioptrie)

Kinder können in einem Bereich zwischen 7 cm und  $\infty$  scharf sehen. Das entspricht einer Akkommodationsbreite von  $1/0,07m - 1/\infty \approx 14$  dpt. Bei Pferd, Hund und Katze beträgt die Akkommodationsbreite 2 - 4 dpt. Kaninchen akkommodieren überhaupt nicht [Penzlin (1996)].

### **Sammellinsen und Aberration**

Eine Sammellinse kann die Strahlen eines parallelen Lichtbündels hinter der Linse vereinigen. Je kleiner die Brennweite ist, desto größer ist die Brechkraft  $D$  der Linse. Ein Maß für die Brechkraft ist der Kehrwert der in Meter (m) gemessenen Brennweite. Für die Brechkraft  $D$  einer Linse gilt:

$D = n_1/f_1 = n_2/f_2$ , wobei  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der Stoffe sind, die die Linse auf der Gegenstandsseite und der Bildseite umgeben und  $f_1$  und  $f_2$  die gegenstandsseitige und bildseitige Brennweite sind. Wenn  $n_1 = n_2 = 1$  (Linse beiderseitig von Luft umgeben) ist, dann ist

$D = 1/f_1 = 1/f_2$ . Eine Linse mit der Brennweite 1 m hat in diesem Fall auf beiden Seiten die Brechkraft 1 Dioptrie.

Einfache Linsen besitzen sphärische Oberflächen, weil sie exakt und kostengünstig herzustellen sind. Achsenferne Strahlen, die durch eine Linse mit sphärischen Oberflächen gehen, werden aber hinter der Linse früher als achsennahe Strahlen fokussiert. Je weiter die einfallenden Strahlen von der Achse entfernt sind, desto mehr weichen sie vom Brennpunkt ab (sphärische Aberration). Der sphärische Fehler macht sich daher bemerkbar, wenn das Lichtbündel breit ist (Bild 4.4.4a). Aus diesem Grund wird in der Praxis oft nur der zentrale Bereich einer Linse benutzt.

Auch die Hornhaut und die Linse des Auges haben im Randbereich eine kürzere Brennweite, daher ist dieser störende Einfluss um so kleiner, je enger die Pupillen sind. Das Optimum der Bildqualität liegt bei einem Pupillendurchmesser von ca. 2,4 mm, ein engerer Pupillendurchmesser würde die Abbildungsqualität wegen der Beugungseffekte verschlechtern [Penzlin (1996)].

Bei Linsen sowie bei Augen tritt außerdem die chromatische Aberration auf, weil kurzwelliges Licht stärker gebrochen wird als langwelliges Licht (Bild 4.4.4b). Das hat zur Folge, dass das Bündellicht nicht in einem einzelnen Punkt fokussiert wird. Das Auge muss daher für rote Gegenstände stärker als für blaue Gegenstände akkommodieren und Rot erscheint meist näher als Blau.

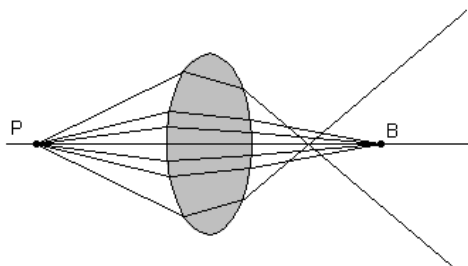


Bild 4.4.4a: Sphärische Aberration bei einer Linse. Achsenferne Strahlen werden vor achsennahen Strahlen fokussiert.

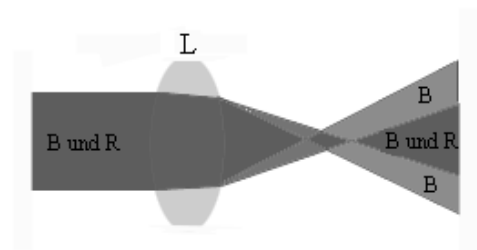


Bild 4.4.4b: Chromatische Aberration bei einer Linse. Die blaue Strahlung (B) wird stärker gebrochen als die rote (R).

## 4.4.1 Fehlsichtigkeiten

In dieser Einheit werden der Aufbau des menschlichen Auges, sowie die häufigsten, optischen Fehlsichtigkeiten und ihre Korrektur behandelt. Das Thema gehört zu den konventionell im Physikunterricht behandelten Stoffen. Es ist trotzdem hier aufgeführt, weil es einige neue methodische Varianten und Experimentiervorschläge enthält.

Die Schülerinnen und Schüler sollen lernen,

- wie das Auge akkomodieren kann;
- welche wichtigen, optischen Fehlsichtigkeiten des Auges es gibt;
- und verstehen, wie mit Brillen Fehlsichtigkeiten korrigiert werden können.

### A. Basiswissen über die Augenrefraktion

#### Refraktionsbestimmung

Das Verhältnis der optischen Gesamtbrechkraft der Augenmedien zur Achsenlänge des Augapfels bestimmt den Brechungszustand des Auges (Refraktion).

Unter Refraktionsbestimmung versteht man die Bestimmung der *zusätzlichen* Brechkraft, die notwendig ist, um auf der Netzhaut ein scharfes Bild zu erhalten. Die einfachste und gebräuchlichste Methode zur subjektiven Bestimmung der Refraktion ist die Prüfung der Sehschärfe (Sehprobe). Es wird zunächst in einem Untersuchungsabstand von 5 m für jedes Auge gesondert (durch Abdecken des anderen) die Sehleistung für die Ferne bestimmt, wobei verschiedene, genormte Sehzeichen (z. B. Zahlen- oder Buchstabenreihen) verwendet werden. Wenn die Sehleistung nicht normal ist, liegt wahrscheinlich ein Brechungsfehler vor. Dann wird durch Vorsetzen entsprechender Brillengläser versucht, normale Sehschärfe zu erreichen.

Die subjektive Prüfung genügt zur Messung der Brechkraft aber nicht, weil die Sehschärfe stark von außerphysikalischen Faktoren abhängt. Daher sind oft objektive Untersuchungsmethoden (z. B. bei Kinder) notwendig.

Es gibt viele Methoden von objektiven Refraktionsbestimmungen. Einige werden mit einfachen Geräten durchgeführt, andere sind durch Computer voll automatisiert.

#### *Normalsichtigkeit (Emmetropie)*

Bei einer normalen Refraktion haben die aus dem Unendlichen parallel auf das Auge treffenden Strahlen ihren Schnittpunkt auf der Netzhaut. Bei einem Missverhältnis zwischen Brechkraft und Achsenlänge erfolgt keine punktförmige Vereinigung der einfallenden Strahlen auf der Netzhaut. Diese Sehfehler bewirken, dass auf der Netzhaut statt eines scharfen Bildes eines Objektes ein unscharfes Bild entsteht.

Selbstverständlich ist der „Schnittpunkt“ eine vereinfachende Abstraktion. Das Licht könnte nie in einem Punkt gebündelt werden.

Abweichungen von der Normalsichtigkeit können genetisch vorbestimmt sein oder durch einseitige Beanspruchungen der Augen erworben werden.

#### *Kurzsichtigkeit (Myopie)*

Hier ist die Augenachse abnormal lang (tritt häufiger auf) bzw. die Brechkraft der Medien zu stark (seltener auftretend). In diesem Fall vereinigen sich parallel einfallende Strahlen vor der Netzhaut im Glaskörperraum. Auf der Netzhaut entstehen Zerstreuungskreise und damit ein unscharfes Bild. Der Fernpunkt liegt in endlicher Entfernung von dem Auge und auch der Nahpunkt liegt näher am Auge als bei Normalsichtigkeit. Die veränderte Lage des Nahpunktes ist ein Vorteil, der zu nahe liegende Fernpunkt ist jedoch ein Nachteil, der korrigiert wer-

den muss. Die Brillenkorrektur zur Verminderung der Brechkraft erfolgt durch Zerstreuungslinsen, die den Fernpunkt (bzw. den Nahpunkt) weiter vom Auge entfernen.

Wenn z. B. der Nahpunkt bei 0,15 m und der Fernpunkt bei 1 m liegt, ist das scharfe Sehen schon ab 15 cm Abstand ein Vorteil aber das unscharfe Sehen ab 1 m muss unbedingt korrigiert werden. Die Brennweite der benötigten Korrekturlinse zur Verschiebung des Fernpunktes von 1 m bis ins Unendliche ergibt sich aus der Additivität der Brechkräfte für dünne Linsen, deren Abstand deutlich kleiner als ihre Brennweiten sind:

$$1/f = (1/\infty) - (1/1 \text{ m}) = -1 \text{ m}^{-1} = -1 \text{ dpt},$$

wobei diese Linsen auch den Nahpunkt auf 17,6 cm verschieben.

Auch wenn noch nicht klar ist, wie das Auge von 17 mm (Geburtslänge) auf 24 mm (Länge des Auges eines Erwachsenen) wächst, bzw. wie Fehlsichtigkeiten entstehen, gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Lesen und Kurzsichtigkeit [Schaeffel (1998)].

Bei der Myopie von Schulkindern verstärkt sich die Kurzsichtigkeit in der Jugendzeit bis zum 25. Lebensjahr, allerdings bleibt die Kurzsichtigkeit in der Regel unter – 6 Dioptrien.

### ***Weitsichtigkeit (Hyperopie)***

Bei diesem Fehler ist die Augenachse abnormal kurz (tritt häufiger auf) bzw. die Brechkraft der brechenden Medien zu schwach (tritt seltener auf). In diesem Fall würden sich parallel einfallende Strahlen hinter der Netzhaut vereinigen und auf der Netzhaut entsteht ein unscharfes Bild. Die Korrektur zur Erhöhung der Brechkraft erfolgt durch die Sammellinse.

Wenn z. B. der Nahpunkt bei 1,5 m liegt, ist die Brennweite der Korrekturlinse dafür, dass Gegenstände in der normalen Sehweite von 25 cm scharf gesehen werden können, gegeben durch

$$1/f = (1/0,25 \text{ m}) - (1/1,5 \text{ m}) \approx 3,3 \text{ m}^{-1} = 3,3 \text{ dpt}$$

### ***Stabsichtigkeit (Astigmatismus)***

Ist die Brechkraft der vertikalen und horizontalen Hornhautmeridiane unterschiedlich, dann treffen sich die einfallenden Strahlen nicht in einen Punkt. Die Brillenkorrektur erfolgt durch zylindrisch geschliffene Gläser, damit die beiden Brechkräfte gleich werden und der einzige Schnittpunkt der einfallenden Strahlen auf der Netzhaut liegen kann.

### ***Altersichtigkeit***

Mit dem Alter nimmt durch zunehmende Verhärtung (Sklerose) des Linsenkerne die Linsenelastizität ab und daher auch die Akkommodationsfähigkeit, so dass nahe Gegenstände nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet werden können. Bemerkbar wird dieser Fehler normalerweise erst nach dem vierten Lebensjahrzehnt. Bei über 50-jährigen liegt der Nahpunkt bei 0,5 m. Ihre Akkommodationsbreite beträgt nur  $1/0,5 \text{ m} - 1/\infty = 2 \text{ dpt}$ . Bei alten Leuten mit Refraktionsfehler kann der Akkommodationsbereich verschieden sein, jedoch ist die Akkommodationsbreite gering.

### **Korrektur von Fehlsichtigkeiten**

Die Fehlsichtigkeiten des Auges werden meistens durch eine Brille korrigiert. Sie führen zu einer wesentlichen Verbesserung der Sehschärfe, allerdings wird das Bild auf der Netzhaut durch eine Zerstreuungslinse verkleinert und durch eine Sammellinse vergrößert. Das kann dann zu einem echten Problem führen, wenn nur ein Auge von starker Fehlsichtigkeit betroffen ist: Die beiden Netzhautbilder sind dann unterschiedlich groß.

Heute werden oft Kontaktlinsen verwendet, die direkt auf die Hornhaut aufzusetzen sind und dort durch Adhäsion haften. Wegen des Wegfalls des Hornhautscheitelabstandes zwischen Hornhaut und Brille ist die Bildveränderung auf der Netzhaut unwesentlich. Nachteile von

Kontaktlinsen liegen trotz moderner Materialien in der Beeinträchtigung des Stoffwechsels der Hornhaut und in möglichen Infektionen bzw. Allergien.

Die Brechkraft der Hornhaut kann auch chirurgisch verändert werden, indem ihre Krümmung durch Abtragung mit einem Laser geändert wird. In den letzten Jahren ist wegen der guten

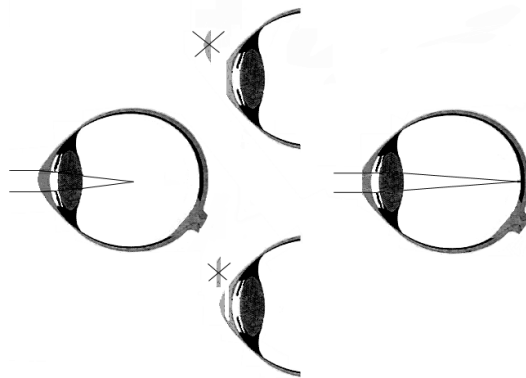


Bild 4.4.1.1: Änderung der Hornhautkrümmung zur Korrektur der Kurzsichtigkeit durch Abtragung von oberflächlichem (oben) bzw. innerem Gewebe (unten).

Ergebnisse, die durch verbesserte Verfahren erreicht wurden, die Zahl von operativen Eingriffen gestiegen, obwohl sie meistens irreversible Korrekturen bedeuten. Bild 4.4.1.1 zeigt, wie die Hornhaut durch Abtragen von Gewebe aus der Oberfläche oder von winzigsten Schichten aus dem Inneren der Hornhaut so modelliert werden kann, dass wieder scharfe Netzhautbilder auch ohne Sehhilfen entstehen [Sachsenweger (1996)]. Neu ist auch die Implantation von Schichten künstlicher Materialien auf der Hornhaut. Es wird auch so eine Änderung der Krümmung geschaffen, allerdings reversibel, weil nach Entfernung dieser Schichten das Auge wieder wie vor der Operation beschaffen ist.



## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### Vorkenntnisse

Durch den vorangegangenen Optikunterricht sollten die Schülerinnen und Schüler

- a) eine qualitative Erklärung des Abbildungsvorgangs durch eine Sammellinse geben können (Bild 4.4.1.2);

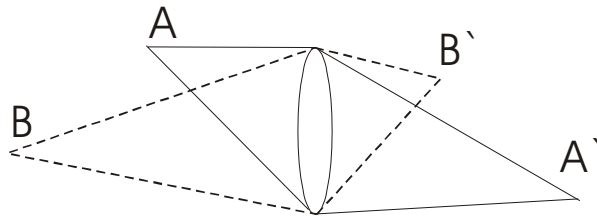


Bild 4.4.1.2: Fleck-zu-Fleck Abbildung durch Lichtbündel bei einer Sammellinse

- b) Bilder der Sammellinse mit Hilfe ausgezeichneter Strahlen konstruieren können;  
c) das Reflexionsgesetz kennen und anwenden können;  
d) das Brechungsgesetz - zumindest in seiner qualitativen Fassung - anwenden können.  
Aus dem medizinischen und biologischen Gebiet werden nur einfache Grundkenntnisse benötigt.

### 1. Aufbau des Auges und Abbildungen durch Sammellinsen

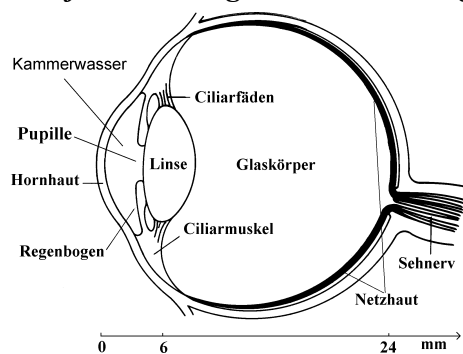


Bild 4.4.1.3: Aufbau eines Auges

Dieser Schritt wird in der Regel nur als Wiederholung des Aufbaus des menschlichen Auges und der Abbildung durch eine Sammellinse in stark abgekürzter Form sinnvoll sein. Nachfolgend werden nur die wichtigen Inhalte kurz beschrieben.

Anhand eines auseinandernehmbaren Augenmodells oder einer Folie nach Bild 4.4.1.3 werden der Aufbau und die Funktion der einzelnen Teile wiederholt.

Es wird besprochen, dass Lichtstrahlen, die in das Auge gelangen, auf dem Weg zur Netzhaut unterschiedliche optische Medien durchdringen und daher mehrfach gebrochen werden. Zur Vereinfachung ersetzt man die Wirkung der gesamten brechenden Flächen durch die Wirkung einer Linse.

Parallellichtbündel werden auf der Netzhaut in einem kleinen Fleck gesammelt (Bild 4.4.1.4).

Bild 4.4.1.4: Brechung der parallelen Lichtstrahlen bei entspanntem, normalsichtigem Auge

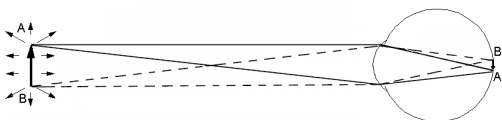


Bild 4.4.1.5: Vom Objekt entsteht ein reelles und umgekehrtes Bild

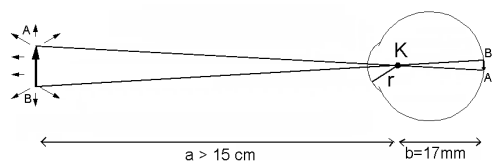


Bild 4.4.1.6: Vom Objekt entsteht ein verkleinertes Bild.

Parallellichtbündel werden auf der Netzhaut in einem kleinen Fleck gesammelt (Bild 4.4.1.4). Zwei kleine Flecken eines beleuchteten Objekts streuen Licht in alle möglichen Richtungen. Die von jedem Fleck in das Auge einfallenden Lichtbündel werden durch die Sammellinse bei normaler Akkommodation zu zusammenlaufenden Lichtbündeln, deren Spitzen auf der Netzhaut liegen. Von den beiden Leuchtflecken A und B entstehen auf der Netzhaut die Bildflecken A' und B' (Bild 4.4.1.5).

Die Verkleinerung des auf der Netzhaut abgebildeten Objektes kann einfach berechnet werden. Man betrachtet die zwei gestreuten Strahlen, die durch die Pupille eintreten (Bild 4.4.1.6). Sie gehen durch das Zentrum der brechenden Oberfläche, stehen auf der Oberfläche senkrecht und werden daher nicht gebrochen und fallen auf die Punkte A' bzw. B'.

Da  $a$  (Entfernung des Objekts)  $\gg b$  (Abstand der Netzhaut von dem Knotenpunkt) ist, wird der Pfeil  $B'A'$  (Bild auf der Netzhaut) kleiner als  $AB$  (Objekt). Geometrisch ist einfach zu verstehen, dass  $B'A'/AB = a/b$ .

Um zu zeigen, dass alle von demselben Punkt kommenden Strahlen durch eine Sammellinse wieder in einem einzigen Punkt, dem Bildpunkt, zusammentreffen, kann folgender Versuch gezeigt werden (4.4.1.7):

Durch horizontale bzw. vertikale Drehung des Spiegels können verschiedene vom Punkt A ausgehende Strahlen hergestellt und z. B. durch Staub gezeigt werden. Alle auf die Linse einfallenden Strahlen treffen den Bildschirm im Punkt  $A'$ , sofern der Abstand zwischen Linse und Bildschirm gleich der durch  $f$  und  $g$  eindeutig bestimmten Bildweite ist.

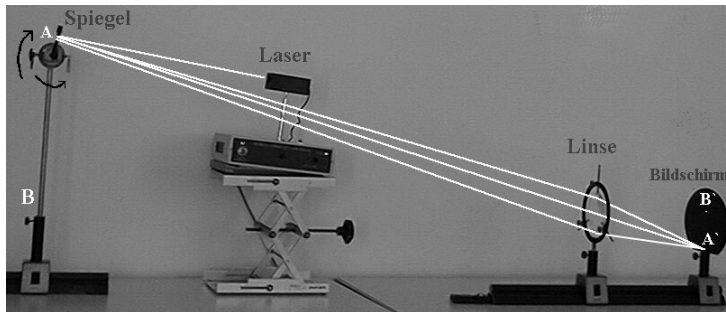


Bild 4.4.1.7: Versuchsaufbau zur Demonstration, dass die von einem Punkt ausgehenden Strahlen hinter einer Sammellinse wieder in einem Punkt zusammentreffen

Verschiebt man den Spiegel nach unten in Richtung des Punktes B, so wandert der zugehörige Bildpunkt nach oben, in Richtung des Punktes  $B'$ .

Das Bild auf der Netzhaut ist wie das Schirmbild kopfstehend und seitenvertauscht.

Beim menschlichen Auge bleibt die Bildweite konstant. Um bei verschiedenen Gegenstandsweiten scharfe Netzhautbilder zu erreichen, muss deshalb die Brechkraft der Augenlinse verändert werden. Bei nahen Gegenständen muss die Linse „dick“ sein, bei weiter entfernten wird sie „flachgezogen“.

Bei nahen Gegenständen muss die Linse „dick“ sein, bei weiter entfernten wird sie „flachgezogen“.

## 2. Beobachtungen an einem akkommodationsfähigen Augenmodell

Das Augenmodell besteht aus einer großen Hohlkugel, in die ein Loch von ca. 2 cm Durchmesser geschnitten wird. In dieses Loch wird z.B. mit doppelseitig klebendem Teppichband eine Linse befestigt, deren Brennweite etwas größer als die Achsenlänge der Kugel ist. Auf der gegenüberliegenden Seite wird eine Kalotte der Kugel herausgeschnitten und mit transparentem Papier verschlossen, auf dem das Bild aufgefangen wird und das sozusagen die Netzhaut darstellt (Bild 4.4.1.8).

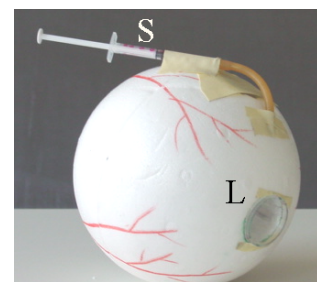
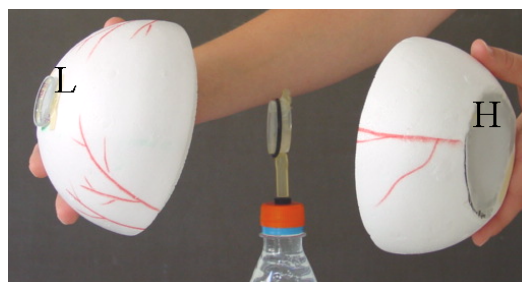


Bild 4.4.1.8: Akkommodationsfähiges Augenmodell.

Das Innere der Kugel sollte mit schwarzer Farbe angestrichen werden, um Streulicht zu eliminieren und den Kontrast zu verbessern. Auf dem Weg von der Linse zum transparenten Papier wird eine akkommodierende Linse eingesetzt, die die Augenlinse darstellt. Sie besteht aus einer Plastikschele, über die ein durchsichtiger Luftballon (Kondom) gezogen wurde. Die Schale wird mit Wasser gefüllt und an einen versorgenden Behälter (Plastikflasche) angeschlossen. Durch das Pressen auf die Flasche fließt zusätzlich Wasser in die Schale, die Gummihaut wölbt sich nach außen. Die Krümmung der Oberfläche bzw. die Lichtbrechung kann dadurch variiert werden (Bild 4.4.1.9). Die Akkommodation erfolgt dann wie beim menschlichen Auge durch Änderung der Brechkraft der Linse. Die Wasserversorgung kann auch durch eine Spritze erfolgen (rechte Abbildung in Bild 4.4.1.8). Das hat den Vorteil, eine

bestimmte Brennweite fest einstellen zu können, sowie (mit einer dünnen Spritze) feine Änderungen der Linsenkrümmung vornehmen zu können.

Man zeigt den Schülern, dass beim Augenmodell, wie beim realen Auge auch, das Scharfstellen auf verschiedene Entfernungen durch Veränderung der Dicke der Linse erfolgt.

Die Schüler sollen auch selber verschiedene Objekte durch das Augenmodell betrachten. Sie sollen erkennen, dass bei Betrachtung von weit entfernten Dingen die Linse dünn ist, hingegen ist sie bei Betrachtung von nahen Dingen dick.

In Bild 4.4.1.10 sind Einzelheiten zur Konstruktion der Gummilinse zu sehen. In den Rand der Schale wird ein Loch gebohrt, um ein Schlauchstück zu befestigen. Das andere Ende wird in einem Schraubverschluss einer Plastikflasche fest gemacht, am besten mit einem breiteren Dichtungsring. Über der Öffnung der Schale wird ein durchsichtiger Luftballon (Kondom) mit Hilfe eines Dichtungsrings befestigt.



Bild 4.4.1.9: unbelasteter Zustand (a). Drückt man auf die Flasche, nimmt die Krümmung zu (b).



Bild 4.4.1.10: Einzelheiten der Linsen

### Bau weiterer, akkommodationsfähiger Augenmodelle

Für den Bau der Linse gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Grundidee ist, dass man über einen Ring eine Gummimembran spannt. Der Ring muss eine Öffnung haben, damit man über eine Pipette das Volumen im bespannten Ring verändern kann. Die Linse wird mit einer durchsichtigen Flüssigkeit (Wasser) gefüllt.

Im Bild 4.4.1.11a-c ist ein kleineres, akkommodierendes Augenmodell dargestellt. Es besteht aus den zwei zusammengesteckten Plastikschälchen  $T_1$  und  $T_2$  (Durchmesser ca. 3 cm). In eine davon wird ein Loch  $L_1$  gebohrt. Zwischen den beiden Schälchen wird eine dünne elastische Folie  $Lu$  (Luftballon, Kondom) eingespannt. Dann werden die Außenschalen angebracht. In die eine Halbschale wird ein Loch geschnitten und eine Linse  $L$  davor befestigt. Ihre Brennweite sollte dem Kugeldurchmesser entsprechen. In die zweite Halbschale wird ebenfalls ein Loch geschnitten und mit Transparentpapier beklebt, das als „Netzhaut“ dient. Durch das Loch  $L_2$  wird Wasser eingeleitet und der Gummi einer Pipette  $P$  angebracht. Drückt man auf diesen, nimmt die Krümmung der Linse zu, die Brechkraft wird größer.

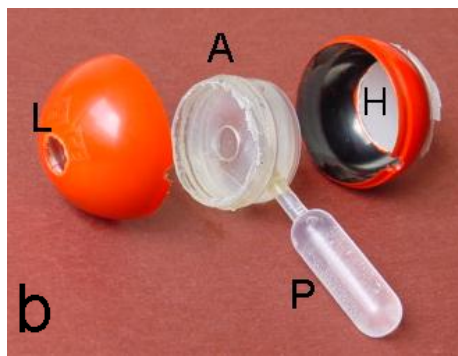
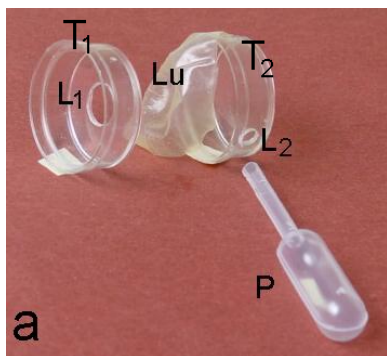


Bild 4.4.1.11: Akkommodierendes Augenmodell.  $L_1$  und  $L_2$  Löcher,  $Lu$  Luftballon,  $P$  Pumpe,  $L$  Linse,  $A$  Augenlinse,  $H$  Hintergrund als Netzhaut.

Das unten beschriebene Modell entspricht am ehesten den realen Bedingungen, da es innen mit Wasser und nicht mit Luft gefüllt ist. Es ist aber etwas aufwendiger zu bauen.

Die benötigten Materialien sind in Bild 4.4.1.12 gezeigt:

- 1) Durchsichtige Kugelschale, bestehend aus zwei Halbkugeln, die dicht abschließen (ca. 10 cm Durchmesser, günstig im Spielwarenhandel erhältlich)
- 2) Rohrstück (ca. 2 cm lang)
- 3) Gummi einer Pipette
- 4) T-Stück (möglichst aus Plastik). Dabei sollte man darauf achten, dass das Rohrstück mit den gegenüber liegenden Öffnungen möglichst kurz ist. Das T-Stück kann man auch selbst herstellen, indem man in ein Plastikrohr (Länge 1 - 2 cm) ein kleineres Rohrstück einsetzt, das gut in das Rohrstück (2) passt.
- 5) 2 Stücke aus durchsichtigem Luftballon (oder Kondom), etwas größer als die Öffnungen des T-Stücks
- 6) 2 Dichtungsringe, die gerade über die gegenüberliegenden Öffnungen des T-Stücks passen (damit wird die Gummihaut befestigt).



Außerdem: 2 runde Aufkleber (Durchmesser: ca. 1 cm und ca. 4 cm), schwarze und weiße Farbe, sehr feines Sandpapier, Klebeband zum Abdichten der zusammengefügt Kugelschalen, Glyzerin (Rizinusöl oder eine andere durchsichtige Flüssigkeit mit hoher Brechzahl), Behälter mit Wasser (zur Vermeidung von Luftblasen wird besser destilliertes oder abgekochtes Wasser verwendet).

Bild 4.4.1.12: Materialien zum Bau eines akkommodationsfähigen Augenmodells

#### *Herstellung des Augenmodells (Bild 4.4.1.13):*

In eine der beiden Halbkugeln wird ein Loch gebohrt, in das ein Rohrstück (ca. 2 cm lang) geklebt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass es wasserdicht gemacht wird. Außerdem sollte es möglichst nahe an der „Pupille“ sein, damit das Bild auf der „Netzhaut“ möglichst groß wird.

In die zweite Halbschale wird ein kleines Loch gebohrt, um später Wasser in die Kugel zu füllen.



Bild 4.4.1.13: Augenmodell, bei dem die Akkommodation wie beim menschlichen Auge durch Änderung der Krümmung der Linse erfolgt (links), rechts: Blick auf die Gummilins im Inneren des Modells.

Die Halbschale, in der sich das kleine Loch befindet, wird mit dem feinen Sandpapier abgeschmirlt. Dadurch wird die Kugelhälfte halbdurchsichtig und erst dann kann man auf dieser Kugelfläche, die die „Netzhaut“ enthält, ein Bild auffangen.

Auf die Halbschale mit dem Rohr (sie wird der vordere Teil des Auges mit der Pupille) wird ein runder Aufkleber mit einem Durchmesser von 1-2 cm geklebt. Auf der gegenüberliegenden Seite (diametral) der Kugel bringt man einen runden Aufkleber mit einem Durchmesser von 3-4 cm an.

Dann färbt man die Kugel schwarz ein, z.B. mit einem Filzstift, und zieht die beiden Aufkleber wieder ab. Um dem Modell eine realitätsnahe Farbe zu geben, kann die Oberfläche noch weiß gestrichen werden.



Über die beiden gegenüberliegenden Öffnungen des T-Stücks wird je ein Stück durchsichtige Gummihaut mit Hilfe der Dichtungsringe befestigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Dichtungsringe gerade über das T-Stück geschoben werden können, so dass die Gummihaut fest und faltenfrei eingespannt ist.

Das T-Stück wird an dem Rohr befestigt, das in der einen Halbschale befestigt wurde. Es muss sich auf Höhe des Kugelmittelpunktes und mit den beiden nicht geschwärzten, runden Flächen in einer Linie befinden.

Nun werden die beiden Kugelhälften zusammengesetzt und entlang der Schnittlinie zusätzlich durch einen Streifen Klebeband abgedichtet.

Die Kugel wird noch mit Wasser gefüllt, jedoch nicht ganz, damit sich die Linse ausdehnen kann.

Zum Schluss wird das T-Stück mit Glyzerin gefüllt und dann wird der Gummi einer Pipette auf das Rohr in der Kugel aufgesteckt. Dabei ist darauf zu achten, dass genügend Glyzerin vorhanden ist, damit die Linse bei Ausdehnung noch vollständig mit Flüssigkeit gefüllt ist.

Das Augenmodell ist nun einsatzbereit. Drückt man auf den Gummi der Pipette, nimmt die Krümmung zu. Auf der „Netzhaut“ kann beobachtet werden, wie auch bei unterschiedlichen Entfernungen durch Verändern der Brechkraft der Linse ein scharfes Bild eingestellt werden kann.

### 3. Fehlsichtigkeiten

Um Fehlsichtigkeiten anschaulich demonstrieren zu können, werden drei verschiedene, nicht akkommodationsfähige Augenmodelle gebaut. Sie bestehen aus leeren Hohlkugeln (Plastikbälle von ca. 6,5 cm Durchmesser, die günstig im Spielwarenhandel erhältlich sind), in denen ein kreisrundes Loch von etwa 1 cm Durchmesser und auf der gegenüberliegenden Seite ein Loch von etwa 3 cm Durchmesser ausgeschnitten sind. Linsen gleicher Brennweite, die dem Durchmesser der Kugel entsprechen, werden jeweils vor der kleineren Öffnung befestigt. Die

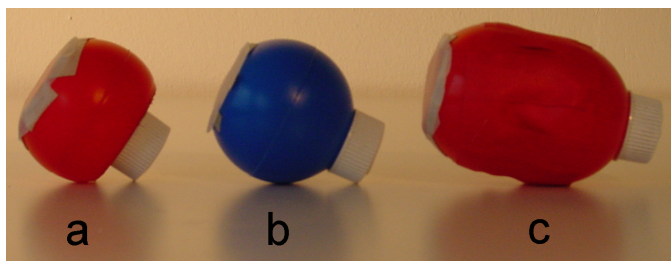


Bild 4.4.1.14: Weitsichtiges Augenmodell (a), wobei die Achsenlänge kürzer als die Brennweite der Linse ist. Normalsichtiges Augenmodell (b), wobei Kugelachse und Brennweite der Linse dieselbe Länge besitzen (6,5 cm), (c) Kurzsichtiges Augenmodell wobei die Achsenlänge größer als die Brennweite ist.

größere Öffnung soll mit transparentem Papier verschlossen werden, auf dem das Bild aufgefangen wird und das die Netzhaut darstellt. Eine Kugel ist normal rund, eine oval (in Richtung der Achse verlängert) und die dritte in der Achse (z.B. 2 cm) verkürzt (Bild 4.4.1.14). Man kann die Linse auch in einen Flaschenhals einsetzen, damit eine, wenn auch kleine Verschiebung der Linse ermöglicht wird und der Abstand Linse-Schirm an die Brennweite angepasst werden kann.

Diese Augenmodelle ohne Akkommodation entsprechen annähernd gut Augen von älteren Menschen, da bei ihnen die Augenlinse ihre Elastizität bzw. Akkommodationsfähigkeit weitgehend verloren hat.

Augenmodelle für junge Menschen benötigen hingegen eine akkommodierende Linse, sonst würden die veranschaulichenden Abläufe weit weg von der Realität liegen.

#### *Normalsichtigkeit*

Die Schülerinnen und Schüler richten ihr normalsichtiges Augenmodell auf verschieden weit entfernte Gegenstände. Sie werden weiter entfernt liegende Objekte scharf und nur nahe Objekte etwas unscharf sehen. Die Schüler werden sich so vorstellen können, dass bei einem

normalsichtigen Auge nur wenig Akkommodation für eine scharfe Einstellung nötig ist und diese durch die Augenlinse erfolgen kann.

### *Kurzsichtigkeit*

Wenn die Schüler ihr kurzsichtiges Augenmodell auf verschieden weit entfernte Gegenstände richten, werden sie feststellen, dass das Bild von weit entfernten Gegenständen sehr unscharf ist, während es von ganz nahen Gegenständen (z. B. 40 cm Entfernung) scharf ist.

Bei Kurzsichtigkeit ist das Auge zu lang. Die Akkommodationsfähigkeit reicht bei weit entfernten Gegenständen nicht aus, das scharfe Bild auf der Netzhaut aufzufangen. Mit den folgenden Bildern kann dies verdeutlicht werden.

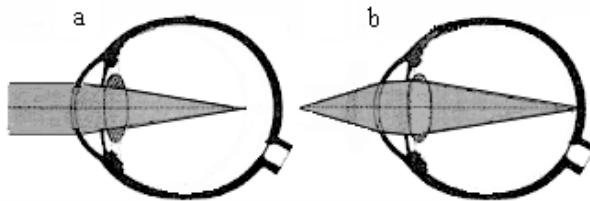


Bild 4.4.1.15: Bildvorlage für ein kurzsichtiges Auge

Das Lichtbündel von einem weit entfernten Leuchtfleck fällt als nahezu paralleles Lichtbündel ins Auge. Die Brechkraft der Augenlinse ist zu groß, so dass der Bildpunkt nicht auf der Netzhaut, sondern davor liegt (Bild 4.4.1.15a). Auf geringe Entfernungen kann das kurzsichtige Auge scharf stellen (Bild 4.4.1.15b).

### *Weitsichtigkeit*

Die Schüler werden durch das weitsichtige Augenmodell feststellen, dass weit entfernte Gegenstände leicht unscharf und nahe Gegenstände sehr unscharf gesehen werden.

In diesem Fall ist das Augenmodell, bzw. das Auge in der Realität zu kurz, und deswegen befindet sich die Ebene auf der das scharfe Bild entstehen würde hinter der Netzhaut (Bild 4.4.1.16). Bei Weitsichtigkeit werden weit entfernte Gegenstände leicht unscharf oder auch scharf wahrgenommen, allerdings durch einen ständigen und daher belastenden Einsatz der Augenlinse, die das Bild auf die Netzhaut bringt.

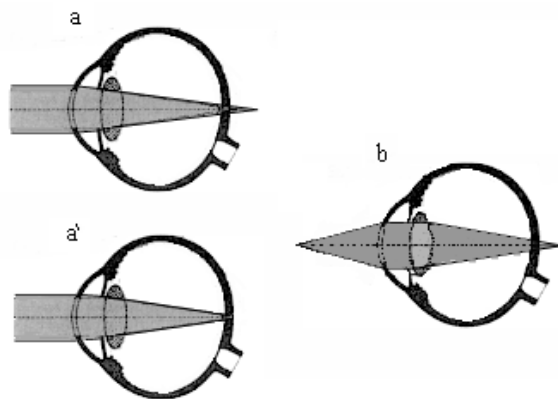


Bild 4.4.1.16: Weitsichtiges Auge bei ausgeschalteter Linsenakkommodation (a). Während weit entfernte Gegenstände durch Anspannung der Augenmuskeln scharf auf die Netzhaut abgebildet werden können (Bild a'), werden nähere Gegenstände immer unscharf auf die Netzhaut abgebildet.

## **4. Korrektur von Fehlsichtigkeiten durch Linsen**

Den Schülern ist bekannt, dass Fehlsichtigkeit durch eine Brille, d.h. durch eine Linse korrigiert werden kann. Ziel ist es zu erkennen, welche Linsenart Kurzsichtigkeit und welche Weitsichtigkeit korrigiert.

### *Korrektur von Kurzsichtigkeit*

Aus dem vorangegangenen Unterricht ist bekannt, dass der Fehler bei Kurzsichtigkeit darin liegt, dass das Bild in einer Ebene vor der Netzhaut entsteht. Die Brechkraft des Auges ist zu groß. Zur Verringerung der Brechkraft muss eine Zerstreuungslinse verwendet werden (Bild 4.4.1.17).

Die Dioptriezahl der für die Korrektur geeigneten Linse gibt den Grad der Kurzsichtigkeit für das Modell an. Die Schüler sollen die geeignete Linse durch Ausprobieren finden.



Bild 4.4.1.17: Korrektur der Fehlsichtigkeit durch eine Linse

#### *Korrektur von Weitsichtigkeit*

Es ist ebenfalls bekannt, dass bei Weitsichtigkeit die Brechkraft des Auges zu gering ist. In diesem Fall muss zur Korrektur eine Sammellinse verwendet werden. Die passende Linse soll auch dieses Mal durch Ausprobieren gefunden werden.

### Fragen zur Übung und Vertiefung

- 1 Wann gibt es Lichtbrechung?
- 2 Welche sind die zwei wichtigsten brechenden Medien des Auges?
- 3 Eine Sammellinse konzentriert parallel einfallendes Licht in 20 cm Entfernung hinter der Linse. Wie groß ist ihre Brechkraft?
- 4 Wird beim Nahsehen die Brennweite kürzer oder länger?
- 5 Wie groß ist der Gesamtbrechwert eines Auges, dessen Brennweite mit 17 mm angenommen wird?
- 6 Ein 1m breites Fenster ist 20 m weit vom Auge entfernt. Wie groß ist das Bild auf der Netzhaut?
- 7 Was ändert sich bei den menschlichen Augen, wenn vom Sehen in die Ferne auf die Nähe umgestellt wird?
- 8 Soll beim Nahsehen die Brechung der Linse größer oder kleiner sein, damit ein scharfes Bild auf der Netzhaut entstehen kann?
- 9 Warum sieht eine kurzsichtige Person weit entfernte Gegenstände unscharf und kann sie nahe Gegenstände scharf sehen?
- 10 Bei Weitsichtigkeit liegt der Brennpunkt hinter der Netzhaut. Welche Linse korrigiert diesen Sehfehler?
- 11 Welche Linse korrigiert die Kurzsichtigkeit?

### Antworten

- 1) Lichtbrechung (Refraktion) kommt zustande, wenn Lichtstrahlen zwei durchsichtige Medien mit unterschiedlicher optischer Dichte passieren
- 2) Wichtige brechende Medien sind die Hornhaut und die Linse. Die Hornhaut, weil sie den größten Teil zur Gesamtbrechung beiträgt (etwa 75 %), und die Linse, weil sie die Brechung ändern kann, sodass der Brennpunkt exakt auf die Netzhaut fallen kann (Akkommodation).
- 3) Die Brechkraft der Linse ist  $D = 1/f = 1/0,2 \text{ m} = 5 \text{ dpt}$ .
- 4) Bei Nahsehen wird die Brennweite länger, weil die Strahlen unter einem größeren Winkel auf die Netzhaut fallen.
- 5) Der Gesamtbrechwert ist  $D = 1/f = 1/0,017 \text{ m} = \text{ca. } 60 \text{ m}^{-1} = 60 \text{ dpt}$ , wobei  $f$  die Brennweite ist.
- 6) Für die Größe  $l$  des Bildes auf der Netzhaut gilt  $l = (1 \cdot 0,017/20) \text{ m} = \text{ca. } 1 \text{ mm}$
- 7) Beim Umstellen vom Sehen in die Ferne auf die Nähe, nimmt die Krümmung der Linse zu.
- 8) Beim Nahsehen haben die Strahlen einen großen Einfallswinkel und daher braucht man eine größere Brechung, damit der Brennpunkt auf die Netzhaut fallen kann.
- 9) Strahlen von weit entfernte Gegenständen kommen in das Auge etwa parallel und sammeln sich bei zu langen Augäpfeln (kurzsichtiges Auge) vor der Netzhaut. Von nahen Gegenständen sind hingegen die in das Auge kommende Strahlen ausreichend divergent und können sich auf der Netzhaut sammeln.
- 10) Eine Konvexlinse, welche die Brennweite verkürzt.
- 11) Eine Zerstreuungslinse, welche die Brennweite verlängert.



## 4.4.2 Untersuchungen des Augenhintergrundes

In dieser Einheit wird gezeigt, mit welchen Hilfsmitteln es möglich ist, den Augenhintergrund zu beobachten und dadurch krankhafte Veränderungen der Netzhaut oder Fehlsichtigkeiten zu erkennen.

Die Schülerinnen und Schüler sollen

- erkennen, dass es unmöglich ist, ohne besondere Hilfsmittel das Innere einer geschlossenen Kugel durch ein Loch zu beleuchten und gleichzeitig den Hintergrund beobachten zu können;
- erkennen, dass ein Augenspiegel das Problem löst;
- mit einem Augenspiegel den Augenhintergrund eines Augenmodells beobachten;
- eine Refraktionsbestimmung an einem Augenmodell durchführen.

### A. Basiswissen über Augenspiegel und Ophthalmoskopie

#### Der Augenspiegel

Unter einem Augenspiegel versteht man ein Instrument, das es ermöglicht, den Augenhintergrund zu beleuchten und gleichzeitig zu betrachten.

Bei den ersten Versuchen wurden ebene Glasplatten als Spiegel verwendet. Heute sind Geräte mit Planspiegel, Hohlspiegel oder Prisma in Kombination mit Linsen üblich.

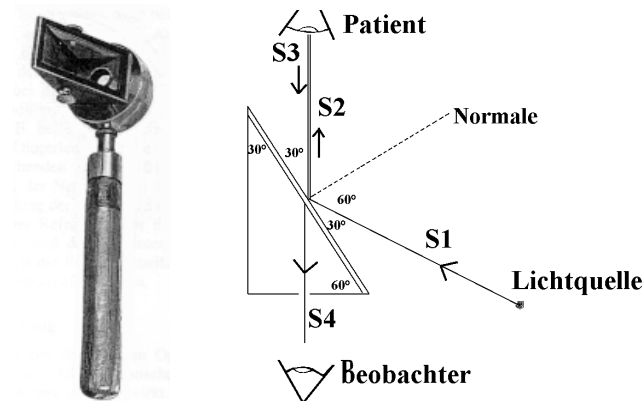


Bild 4.4.2.1: Augenspiegel nach Helmholtz (a), in (b) Lichtweg.

In Bild 4.4.2.1 ist das erste Augenspiegelmodell nach Helmholtz dargestellt, wobei 3-4 schräggestellte (ca.  $60^\circ$ ), planparallele Glasplatten als halbdurchlässiges Medium bzw. Reflektoren wirken. Die nötige Beleuchtungsintensität lässt sich auch allein mit einer Glasplatte als Spiegel und einem größeren Winkel erreichen. Mehrere Glasplatten vermindern aber den Hornhautreflex besser [Helmholtz (1851)].

Die planparallelen Glasplatten waren der geniale Einfall für den Durchbruch der Erfindung, aber nicht die optimale Lösung, weil nur ein Teil des am Augen-

hintergrund gestreuten Lichtes das beobachtete Auge erreicht: In der Lichtbahn in Bild 4.3.2.1b, treffen die Strahlen  $S_1$  von der Lichtquelle mit einem Winkel von  $60^\circ$  zur Normalen auf den Spiegel. Ein Teil der Strahlung  $S_2$  wird von allen planparallelen Glasplatten zum Auge reflektiert und ein Teil geht durch Brechung verloren. Der von dem Augenhintergrund gestreute, noch geringere Teil der Strahlung  $S_3$  wird an dem Spiegel nicht nur verschoben, sondern auch geteilt und nur ein Teil  $S_4$  fällt in das Auge des Beobachters. Es ist experimentell leicht nachzuweisen, dass bei einem sehr flachen Einfallswinkel mehr Licht reflektiert wird und so eine größere Lichtmenge ins Patientenaugen eintritt, jedoch geht von der Strahlung  $S_3$ , die ebenfalls flach auf den Spiegel trifft, wieder viel Licht durch Reflexion verloren, so dass auch in diesem Fall nur ein kleiner Teil ( $S_4$ ) davon ins Beobachteraugen gelangt. Für Helmholtz hat sich bei dem damals verwendeten Licht und unter Berücksichtigung der störenden Reflexionen, ungefähr ein Winkel von  $60^\circ$  zur Normalen als optimal erwiesen.

In Bild 4.4.2.2 ist ein Hohlspiegel mit Handgriff nach Anagnostakis dargestellt, der mehr Erfolg gehabt hat. Dabei tritt das zentrale Strahlenbündel ohne Verlust durch das Loch und fällt auf die Beobachterpupille.

In vielen Augenspiegeln besteht die Möglichkeit, Korrekturlinsen in den Okularteil einzubringen, was für die Refraktionsbestimmung von Bedeutung ist.

Bild 4.4.2.3a bzw. 4.4.2.3b zeigt einen modernen Augenspiegel bzw. ein vereinfachtes Schema. Der Lichtstrahl von der Glühlampe wird mittels eines Spiegels zum Patientenauge umgelenkt. Nach Streuung auf dem Augenhintergrund fällt das Licht in das Beobachteraue. Da die Lichtwege getrennt sind, werden störende Reflexionen vermieden. Bei diesem Gerät lassen sich Farbfilter (F) vorschalten, so dass z.B. eine Untersuchung im rotfreien Licht möglich ist, um die roten Adern besser sehen zu können. Außerdem kann man für die Refraktionsbestimmung Korrekturlinsen (K) in den Strahlengang einsetzen.



Bild 4.4.2.2: Augenspiegel (Hohlspiegel) nach Anagnostakis.

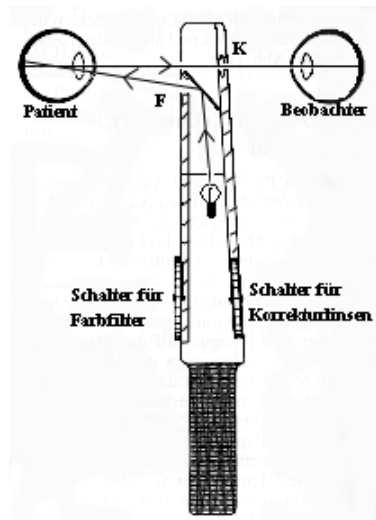


Bild 4.4.2.3: Moderner Augenspiegel (links) und Schema des Aufbaus (rechts). F bzw. K sind Farblinsen bzw. Korrekturlinsen.

### Untersuchung mit dem Augenspiegel

Mit der Erfindung des Augenspiegels haben sich zwei verschiedene Verfahren zur Untersuchung des Augenhintergrundes ergeben: Die direkte (aufrechtes Bild) und die indirekte (umgekehrtes Bild) Methode [Straub (1984); Nover (1970)]. Die Untersuchung im aufrechten Bild wird durch jene im umgekehrten Bild ergänzt. Die Erste verschafft einen größeren Überblick, die Zweite gestattet bei stärkerer Vergrößerung Detailbeobachtungen in einem kleineren Ausschnitt. Meistens verwendet man einen Tropfen einer Substanz, um die Pupille zu erweitern und die Akkommodation der Linse auszuschalten. Zur Zeit werden auch andere Mittel (Fotokamera, fluoreszierende Substanzen usw.) benutzt, um Veränderungen, Verletzungen und Entzündungen am Augenhintergrund besser nachweisen zu können. Die Untersuchung im aufrechten Bild ist auch zur Bestimmung von Refraktionsfehlern geeignet.

#### *Direkte Ophthalmoskopie (Untersuchung im aufrechten Bild)*

In Bild 4.4.2.4 ist die Anordnung einer direkten Ophthalmoskopie dargestellt, wobei der Abstand zwischen Beobachter- und Patientenaue nur wenige Zentimeter beträgt. Die von der seitlichen Lichtquelle kommenden Strahlen werden vom Hohlspiegel reflektiert und etwa parallel bis zum untersuchten Auge weitergeführt. Dann treten sie durch die Pupille in das Patientenaue ein.

Ist das untersuchte Auge normalsichtig, so verläuft das von dem Auge kommende Lichtbündel parallel zum beleuchtenden Lichtbündel. Falls das Beobachteraue auch normalsichtig ist,

vereinigen sich die Lichtstrahlen auf der Netzhaut und es entsteht hier ein scharfes, aufrechtes Bild der Patientennetzhaut.

Hat der Patient eine Myopie bzw. Hyperopie, dann entsteht für den Beobachter ein unscharfes Bild. Während der Untersuchung kann man verschieden starke Linsen vorsetzen und dadurch Refraktionsanomalien des Beobachters und des Patienten ausgleichen und immer ein scharfes Bild des Augenhintergrunds erhalten: Die zur Scharfeinstellung notwendigen Linsen lassen zugleich die Höhe des Brechungsfehlers erkennen. Ist aber das Beobachteraue ametro (fehlsichtig), dann muss zur Erreichung eines scharfen Bildes der Brechwert der Korrekturlinse gleich der Summe der Brechwerte der beiden Augen (Beobachteraue und untersuchtes Auge) sein.

Im Fall eines Astigmatismus, lässt sich die Refraktionsanomalie mit normalen Linsen nicht ausgleichen. Das Bild des Augenhintergrunds bleibt unscharf, wodurch das Erkennen diskreter Veränderungen erschwert ist.

In einer direkten Ophthalmoskopie erscheint das Bild des Augenhintergrunds vergrößert. Der Vergrößerungsfaktor  $V$  beruht darauf, dass das System Hornhaut-Linse des untersuchten Auges als Sammellinse wirkt. Nach der Formel  $V = s_0/f$  ist der Vergrößerungsfaktor bei normal-sichtigen Augen etwa 15, weil  $s_0$  definitionsgemäß die auf 25 cm festgesetzte deutliche Sehweite bezeichnet und die Brennweite  $f$  (bei entspannter Akkommodation) ca. 1,7 cm beträgt. Im hochmyopen Auge ist die Vergrößerung höher.

Weist die Netzhaut Niveaudifferenzen auf, so benötigt man verschiedene Linsen, um die auf der Netzhaut liegenden Strukturen scharf zu sehen. Auf diese Weise lassen sich recht exakte Niveaumessungen vornehmen, wobei ein Unterschied von 3 dpt etwa 1 mm entspricht.

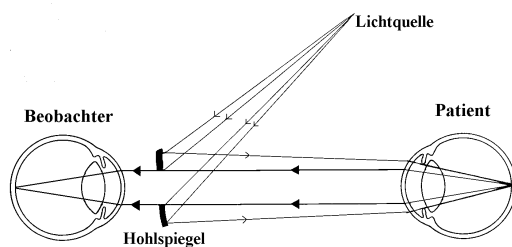


Bild 4.4.2.4: Das von dem Hohlspiegel reflektierte Licht beleuchtet den untersuchten Augenhintergrund, aus dem der gestreute Lichtanteil durch das zentrale Loch im Hohlspiegel zum Beobachteraue kommt, das ein aufrechtes Bild des Augenhintergrundes sieht.

### **Indirekte Ophthalmoskopie (Untersuchung im umgekehrten Bild)**

Die Anordnung einer Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild unterscheidet sich von jener im aufrechten Bild durch Einfügen einer Sammellinse vor dem zu untersuchenden Auge.

Außerdem ist der Abstand zwischen Arzt und Patient größer (Bild 4.4.2.5). Man erhält auf diese Weise im vorderen Brennpunkt der Lupe ein Bild der Netzhaut des Patienten, auf das der Beobachter in genügend großem Abstand sein Auge akkommodieren muss. Es ist ein umgekehrtes Bild: Was unterhalb der Pupille liegt, erscheint oberhalb und umgekehrt.

Die (in der Regel 2-6fache) Vergrößerung hängt von der benutzten Lupe ab. Je schwächer die Lupe ist, um so größer ist das Bild. Eine übliche Anordnung besteht aus einer Lupe mit 16 dpt, die etwa 6 cm vor das Patientenaue gehalten wird, wobei der Beobachter 60 cm vom Patienten entfernt sein soll. Das ergibt etwa eine 4,5fache Vergrößerung [Grehn (1998)].

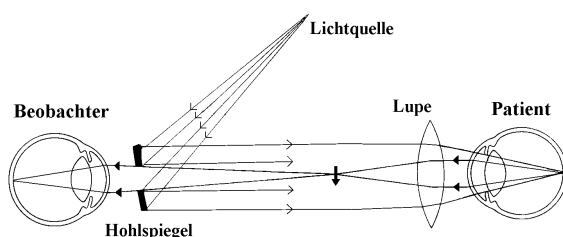


Bild 4.4.2.5: Anordnung einer Untersuchung im umgekehrten Bild. Der Beobachter sieht ein auf dem Kopf stehendes Bild des Augenhintergrundes.

## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einleitung

Man kann mit einer kurzen, historisch orientierten Einleitung beginnen:

1850 entdeckte Helmholtz den Augenspiegel (Ophthalmoskop), mit dem er den Augenhintergrund untersuchen konnte. Mit dieser Entdeckung begann die Entwicklung einer einfachen Untersuchungsmethode, um den Augenhintergrund in ausreichender Vergrößerung direkt beobachten zu können. Heute stellt die moderne Technik komplizierte Geräte und Methoden zur Untersuchung der Augen zur Verfügung. Jedoch ist der Augenspiegel, allerdings mit einigen Modifikationen, als relativ einfaches Untersuchungsgerät noch immer im Gebrauch [Schett (1996)].

Man kann dazu den Schüler das Bild 4.4.2.6 auf einer Folie (Hintergrund eines Auges) zeigen.

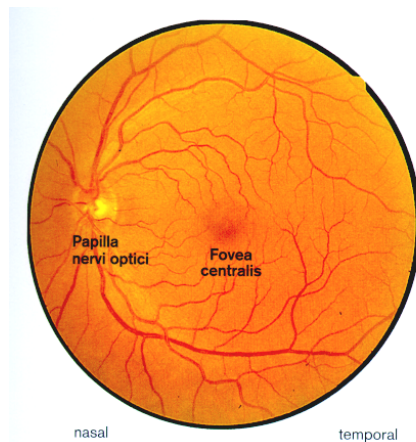


Bild 4.4.2.6: Augenhintergrund (linkes Auge) durch einen Augenspiegel gesehen [aus Klinka (2000)].

### 2. Versuch, den „Augenhintergrund“ zu betrachten

Mit diesem Schritt sollen die Schülerinnen und Schüler erfahren, dass die Beobachtung des Inneren einer bis auf eine kleine Öffnung geschlossenen Kugel ohne Augenspiegel wegen der gegenseitigen Störung von Beleuchtung und Beobachtung kaum möglich ist. Dazu wird den Schülerinnen und Schülern zunächst ein einfaches Augenmodell gegeben. Es besteht nur aus einer Hohlkugel (z.B. um 10 cm Durchmesser), in die ein Loch von 3-4 mm gebohrt wurde und die Pupille darstellt. Den Augenhintergrund stellt ein kleines, kontrastreiches Bildchen dar, das auf der Innenseite der Kugel, gegenüber der Pupillenöffnung, befestigt wird. Das Innere der Kugel sollte schwarz angestrichen sein.

Die Schüler sollen mit Hilfe einer lichtstarken Taschenlampe als Lichtquelle den Hintergrund durch das Loch beleuchten und ihn gleichzeitig durch das Loch hindurch beobachten. Sie werden feststellen, dass ihnen die Taschenlampe im Wege ist, oder der Augenhintergrund nicht beleuchtet werden kann.

### 3. Der Augenspiegel als Lösung des Problems

Nach einer Diskussion über Lösungsmöglichkeiten wird der Augenspiegel eingeführt.

Aus Spiegelfolie werden Quadrate der Größe 5 cm x 5 cm ausgeschnitten. In die Mitte wird ein Loch von ca. 0,5 cm Durchmesser gebohrt. Dadurch kann man von hinten durch den Spiegel hindurchsehen.

Eine andere praktikable Variante besteht aus drei aufeinandergelegten Glasplatten (z. B. Mikroskopobjektträger), hinter die eine dunkle Pappe mit einem Loch von ca. 0,5 cm Durchmesser geklemmt ist. Eine einzelne Glasplatte funktioniert ebenfalls, allerdings ist der Anteil des zum Auge reflektierten Lichtes und damit die Beleuchtung des Hintergrundes deutlich schwächer.

Der Augenspiegel wird mit schulüblichen Mitteln aufgestellt (oder in einen Klumpen Knete gesteckt). Das Augenmodell wird auf eine geeignete Unterlage, z. B. auf einen Buchstapel oder ein Experimentiertischchen, gelegt, so dass die richtige Position zur Beleuchtung des Hintergrundes und zur Betrachtung relativ einfach gefunden werden kann.

Nachdem die Schülerinnen und Schüler die prinzipielle Funktionsweise des Augenspiegels an dem einfachen Augenmodell kennengelernt haben und dies besprochen und festgehalten wurde, geht man zu einem realistischeren Augenmodell über.

#### 4. Beobachtung des „Augenhintergrunds“

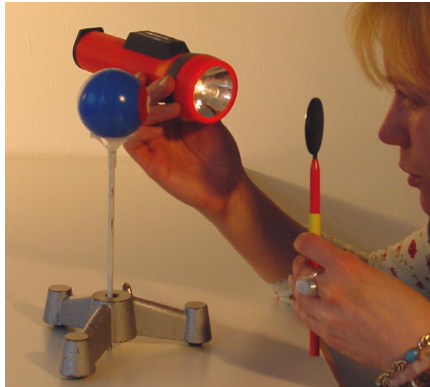


Bild 4.4.2.7: Beobachtung des Hintergrunds des Augenmodells.

Deutlich realistischer ist es, das Augenmodell durch eine Sammellinse zu ergänzen. Damit liegt ein Augenmodell vor, allerdings unfähig zu akkommodieren. Die Schüler können dann das Augenmodell nach der Methode der Beobachtung im aufrechten Bild untersuchen, so wie die Augenärzte ein lebendes Auge untersuchen würden. Eine praktikable Lösung ist das Einkleben einer Kunststofflinse mit einer Brennweite gleich der Achselänge der Kugel. Die „Pupillenöffnung“ wird vorher auf etwa 1 cm Durchmesser vergrößert.

Man versucht nach Anordnung von Bild 4.4.2.7 die auf der Netzhaut befestigte kleine scharfe Zeichnung anzuschauen, wobei in diesem Bild ein medizinischer Augenspiegel anstelle der Spiegelfliese zu sehen ist.

#### 5. Refraktionsbestimmung an dem Augenmodell

Die Schülerinnen und Schüler sollen feststellen, dass die Zeichnung nur bei einem bestimmten Verhältnis zwischen Brechkraft der Linse und Achsenlänge der Kugel (normalsichtiges Auge) scharf zu sehen ist. Wird ein Missverhältnis zwischen Brechkraft der Linse und Achsenlänge der Kugel z. B. durch Benutzung einer Linse höherer oder niedrigerer Brechkraft erzeugt, werden die Schüler beobachten, dass die Zeichnung unscharf wird, was als fehlerhafte Akkommodationsfähigkeit interpretiert werden kann.

Zur Korrektur hält man verschiedene Linsen vor das Augenmodell, bis man die gefunden hat, die wieder zu einem scharfen Bild führt (Refraktionsbestimmung). Die Brennweite der zusätzlich erforderlichen Sammel- bzw. Zerstreuungslinse gibt die Höhe der Weit- bzw. Kurzsichtigkeit an.

Die Untersuchung kann man (wie im Text) auch im „umgekehrten Bild“ durchführen, wobei man wegen der zusätzlichen Lupe L (z. B. von 20 dpt) mehr Sorgfalt im Aufbau des Versuches braucht (Bild 4.4.2.8). Die Refraktionsbestimmung ist hier aber schwierig und deshalb für den Unterricht nicht empfehlenswert, weil die Stärke und der Abstand der Lupe L auch noch zu berücksichtigen sind.

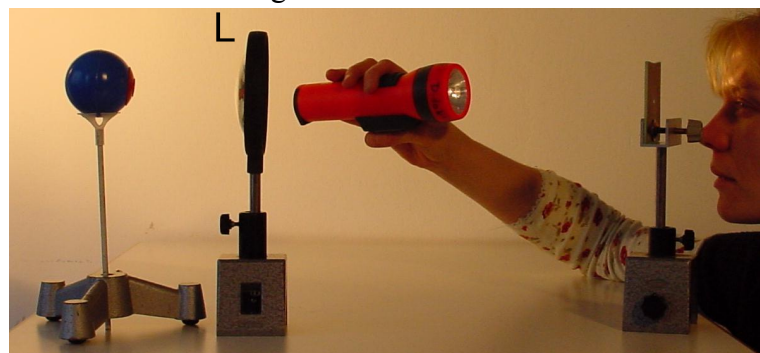


Bild 4.4.2.8: Untersuchung eines Augenmodells im umgekehrten Bild mit einer Lupe L von 20 dpt.

Prinzipiell können auch die Schüler eine Beobachtung an lebenden Augen durchführen. Ohne Erfahrung ist aber eine sehr große Geduld erforderlich, weil kein sehr intensives Licht verwendet werden kann. Hinzu kommt, dass sich die Pupille normalerweise mit zunehmender Helligkeit verengt und dadurch der Einblick schlechter wird.

### 4.4.3 Sehen unter Wasser

Die Unterrichtseinheit beschäftigt sich mit dem Problem, wie die Akkommodation unter Wasser erfolgt, wo es so gut wie keine Brechung an der Grenzfläche Wasser – Hornhaut gibt. Es wird der Unterschied zwischen dem Sehen in Luft und unter Wasser gezeigt. Es werden verschiedene Arten der Akkommodation vorgestellt, die in der lebenden Natur gegeben sind. In dieser Einheit sollen die Schülerinnen und Schüler erkennen, warum unter Wasser Gegenstände verschwommen wahrgenommen werden und dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, ein Bild auf der Netzhaut zu fokussieren

#### A. Basiswissen über Fischaugen und deren Akkommodation

##### Brechung am Auge unter Wasser

Die Brechung der Lichtstrahlen ist durch den Unterschied in der optischen Dichte der Medien bestimmt. Wird die Luft vor dem Auge durch Wasser ersetzt, so nimmt die Brechung an der Hornhaut stark ab, weil die Hornhaut und das Wasser etwa denselben Brechungsindex besitzen. Zur Kompensation müssen deswegen Wassertiere bzw. tauchende Tiere eine stärker brechende Linse besitzen. Während Landtiere und Menschen die Linse zur Akkommodation benutzen, brauchen Wassertiere die Linse zur Sammlung (Konzentrierung) der Lichtbündel auf einen Punkt der Netzhaut. Die Akkommodation wird durch die Verschiebung der Linse erreicht.

##### Das Fischauge

Die Brechkraft an der Hornhaut in Wasser ist viel geringer als in Luft. Die Krümmung der Hornhaut ist daher für die Lichtbrechung bei Fischen ohne große Bedeutung. Deswegen besitzen Fische eine sphärische Linse mit einer hohen Brechkraft. Die Linse ist normalerweise hart und nicht elastisch wie beim Menschen. Es wird akkommodiert, indem der Abstand der Linse zur Netzhaut verändert wird.

Der Brechungsindex der Linse erhöht sich wegen der Linseninhomogenität von der Peripherie zum Zentrum, damit die sphärische Aberration verhindert wird. Die achromatische Aberration der Linse wird durch eine unterschiedlich tiefe Lage der verschiedenen Rezeptortypen in der Retina zum Teil kompensiert (Penzlin, 1996).

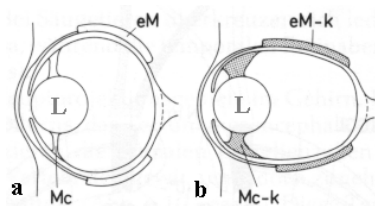


Bild 4.4.3.1: Tintenfischauge: (a) entspanntes Auge, auf geringe Entfernungen akkommodiert; eM extraokulärer Muskel entspannt, Mc Ciliarmuskel entspannt; (b) Akkommodation auf kleinere Entfernungen, extraokulärer Muskel eM-k und Ciliarmuskel Mc-k kontrahiert. [Aus Horn (1982)].

Die Akkommodationsform durch Änderung des Abstandes Linse-Netzhaut wird in der Natur auf mehrere Arten realisiert. Bei Tintenfischen (Bild 4.4.3.1a) greift der Ciliarmuskel Mc direkt an der (kugelförmigen) Linse L an [Horn (1982)]. Bei Kontraktion verformt sich der Glaskörper und die Netzhaut entfernt sich von der Linse (Bild 4.4.3.1b): das Auge akkommodiert auf eine kleinere Gegenstandsweite. Die Akkommodation wird durch die Kontraktion des äußeren Muskels eM unterstützt.

Dasselbe wird von anderen Tierarten (z.B. Borstenwürmer) erreicht, indem die Menge des Glaskörperinhalts mittels einer außerhalb des Augapfels befindlichen Drüse vergrößert und damit der Augapfel ausgedehnt und die Linse von der Netzhaut entfernt wird.

Beim Neunauge greifen seitlich am Augapfel gelegene Muskeln an, bei deren Kontraktion die Linse in Richtung der Netzhaut gezogen wird. (Bild 4.4.3.2)

Bei Knochenfischen verschiebt sich dagegen die Linse durch Muskeln, die direkt an der Linse ansetzen, in Richtung der Netzhaut (Bild 4.4.3.3). Die Position der Linse ist bei Knochenfischen im Ruhezustand so, dass Objekte, die unmittelbar vor den Augen sind, scharf abgebildet werden. Die Akkommodation auf die Ferne erfolgt, indem die Linse gegen die Netzhaut bewegt wird.

Bild 4.4.3.3 zeigt, dass die Hornhaut der Knochenfische nur geringfügig gekrümmt ist. Der wesentliche Grund für diese Augenform liegt in den vergleichbar großen Brechzahlen von Hornhautgewebe und Wasser. Fische und insbesondere Tiere, die sowohl in der Luft als auch im Wasser leben (z. B. Pinguine), besitzen normalerweise nur eine gering gewölbte Hornhaut, sonst wäre der Unterschied zwischen der Brechung in Luft und im Wasser zu groß.

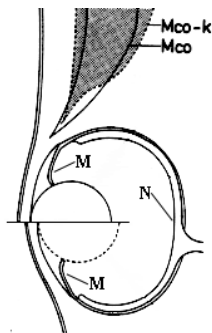


Bild 4.4.3.2: Auge eines Neunauges. Mco bzw. Mco-k Musculus cornealis entspannt bzw. kontrahiert, N Netzhaut [aus Horn (1982)]

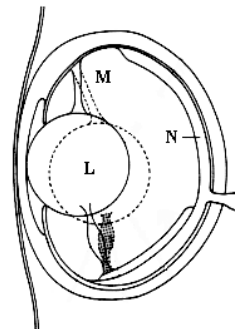


Bild 4.4.3.3: Auge eines Knochenfisches. L Linse, M Musculus retractor lentis entspannt bzw. kontrahiert, N Netzhaut [aus Horn (1982)]

In Bild 4.4.3.4 ist das Auge eines Haies dargestellt, das auf unendlich (Ruhezustand) eingestellt ist. Die Scharfstellung wird durch die Kontraktion der Muskeln M bewirkt, wodurch der Abstand der Linse L von der Netzhaut N vergrößert und damit auf geringere Entfernungen akkommodiert wird.

Besonders interessant ist der Sehapparat bei Tieren, die außerhalb und im Wasser scharf sehen müssen. In Bild 4.4.3.5 ist die Akkommodation beim Kormoran gezeigt. Hier wird das Auge so gequetscht, dass sich sowohl Hornhaut als auch Linse stärker wölben. Dieser Zustand ist natürlich sehr anstrengend und deshalb nur für kurze Zeit haltbar.

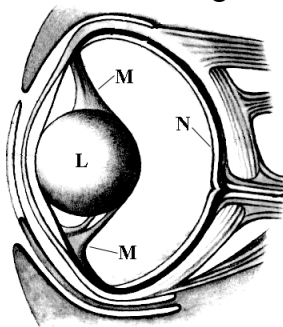


Bild 4.4.3.4: Auge eines Haifisches. M Muskeln L Linse N Retina [nach Mojetta (1997)]

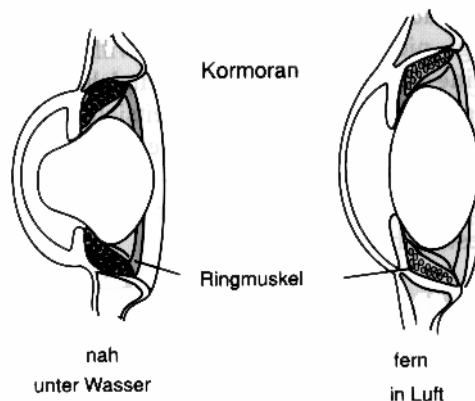


Bild 4.4.3.5: Akkommodation beim Kormoran [aus Müller (1998)]

Ein weiterer interessanter Vertreter ist der in Bild 4.4.3.6a abgebildete „Vieraugenfisch“ (Anableps tetraphthalmus), der zwei relativ große, in zwei Hälften geteilte Augen besitzt. Die obere Hälfte dient zum Sehen oberhalb der Wasseroberfläche bei der Jagd nach Insekten, die untere zum gleichzeitigen Sehen unter Wasser.

Bild 4.4.3.6b zeigt den Aufbau des Auges des Anableps. Die Augenlinse ist etwa eiförmig und füllt das Augeninnere weitgehend aus. Sie kann gleichzeitig zwei Bilder fokussieren, eines vom Bereich über dem Wasser und eines vom Unterwasserbereich.

Auf Grund der großen Unterschiede der Brechzahlen von Wasser und Luft gilt im Allgemeinen: Augen, die für das Sehen in Luft optimiert sind, sind unter Wasser stark weitsichtig. Augen von im Wasser lebenden Tieren sind in Luft kurzsichtig, wenn ihre Hornhaut gekrümmt ist. Ist die Hornhaut wie bei vielen Fischen weitgehend eben, dann ist die Brechkraft an der Oberfläche der Hornhaut praktisch unabhängig davon, ob davor Luft oder Wasser ist. Bei Tieren, die sowohl in Wasser als auch an Land leben, sind die Fehlsichtigkeiten je nach Hauptlebensraum bzw. Gefahren entweder in die eine oder die andere Richtung stärker ausgeprägt. Die Pinguine sind z. B. in Luft kurzsichtig und im Wasser, wo sie ihre Nahrung finden sollen, normalsichtig.

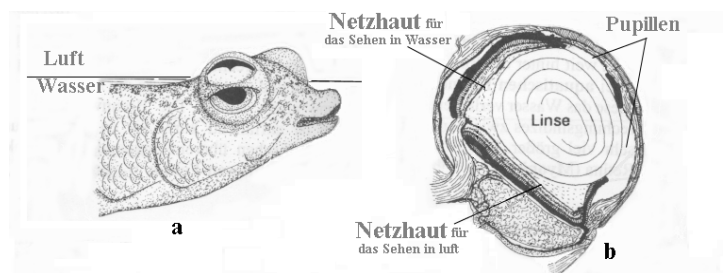


Bild 4.4.3.6: Vieraugenfisch, der zweigeteilte Augen besitzt. Der untere Teil dient zum Sehen im Wasser und der obere zum Sehen in der Luft. (b) Querschnitt durch das Auge [aus Penzlin (1996)].



## B. Vorschläge zur Unterrichtsdurchführung

### 1. Einführung in verschiedene Formen der Akkommodation

Zur Einführung projiziert man den Aufbau verschiedener Tieraugen und des Menschen und beschreibt die unterschiedlichen Akkommodationsformen.

Mit den folgenden Fragen (Antworten jeweils in Klammern) kann das Gespräch angeregt werden:

- *Warum gibt es in der Natur viele Unterschiede im Augenaufbau?* (Weil sich jedes Tier an seine Umgebungen angepasst hat und weil jedes Tier eine bestimmte Stellung im Ökosystem einnimmt, die eine bestimmte Form des Auges notwendig macht. So sind in der Regel z. B. die Augen von Jagdtieren (wie der Adler) im Ruhezustand auf unendlich eingestellt, während die Augen von Beutetieren auf Nähe eingestellt sind.)
- *Warum besitzen Vögel normalerweise einen breiten Akkommodationsbereich?* (Weil sie sowohl nahe als auch weit entfernte Objekte scharf abbilden sollen.)
- *Warum akkommodieren Fische ganz anders als Menschen und als die meistens Tiere?* (Weil die Brechung an der Grenzfläche Hornhaut - Wasser gering ist.)
- *Wie schaffen es Fische eine genügend große Brechkraft zu erzielen?* (Durch eine größere Krümmung der Linse).
- *Warum akkommodieren Fische hauptsächlich durch Änderung des Abstands Linse - Netzhaut?* (Weil Fische eine starre, sphärische Linse besitzen. Damit das Bild auf der Netzhaut liegt, muss die Entfernung Linse - Netzhaut verändert werden.)

### 2. Verminderung der Linsenbrechkraft unter Wasser

Die Augenquerschnitte von Fischen auf der Folie zeigen, dass der Übergang Wasser-Auge verhältnismäßig eben ist und nicht so stark gewölbt wie beim Menschen und auf dem Land lebender Tiere ist. Weiterhin fällt die kugelförmige Linse auf. Offensichtlich benötigen Fische eine sehr starke Linse. Dass es dafür physikalische Gründe gibt, soll nun geklärt werden.

#### Vorbereitung des Augenmodells

Als nächstes bauen die Schülerinnen und Schüler ein akkommodationsfähiges Modell eines Auges, falls nicht ein Satz vorhanden ist. Der sehr einfache „Augenkörper“ besteht aus einer Plastikflasche mit Schraubverschluss und einem Durchmesser von etwa 6 cm oder größer (Bild 4.4.3.7). Gut geeignet sind Flaschen mit Spritzverschluss (z. B. für Aufbewahrungsflüssigkeiten für Kontaktlinsen). Die Spitze wird soweit abgeschnitten, dass eine Plastiklinse mit 1,5 cm Durchmesser, Brennweite etwa 6,5 cm, mittels eines Gummiabdichtungsringes straff

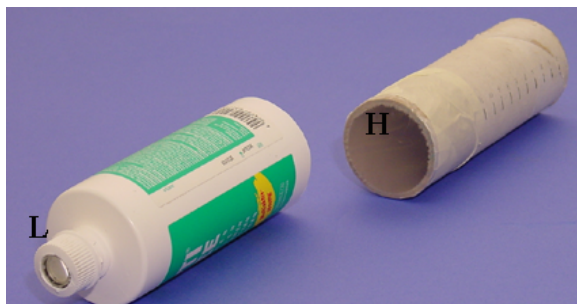


Bild 4.4.3.7: Wasserdichtes Augenmodell, das für Beobachtungen unter Wasser geeignet ist. L: in die Verschlusskappe eingefügte Linse, H: Transparentes Papier für „Netzhaut“ Beobachtungen von der Rückseite.

hineingedrückt werden kann. Die gewölbte Seite der Linse soll nach außen zeigen.

Die Akkommodation erfolgt dann nicht wie beim menschlichen Auge durch Änderung der Brechkraft der Linse, sondern durch Anpassung der Bildweite.

Das Innere, verschiebbare Rohr ist an einem Ende mit transparentem Papier verschlossen, auf dem das Bild aufgefangen wird und das die Netzhaut darstellt. Die Innenseite der Flasche sollte mit schwarzer Farbe angestrichen werden, um Streulicht zu eliminieren. Bei der Wahl des Rohrs ist darauf zu achten, dass es gut in die Flasche passt.

### 3. Sehen unter Wasser

Als nächstes führen die Schülerinnen und Schüler einen Versuch durch, der das Sehen eines menschlichen Auges unter Wasser simuliert.

Ein etwa 20 cm hohes Glasgefäß mit Wasser wird auf ein beschriebenes Blatt Papier (besser Folie) gestellt. Nun wird zunächst auf die Schrift neben dem Gefäß scharf gestellt (vor der Linse ist also Luft) (Bild 4.4.3.8a). Danach wird das Modellauge soweit in das Wasser eingetaucht (Bild 4.4.3.8b), dass wieder der gleiche Abstand Gegenstand – Schrift vorhanden ist. Das Bild der Schrift lässt sich nicht mehr scharf einstellen (Die Brechkraft der Linse in Wasser ist so klein, dass sich das Papier innerhalb der einfachen Brennweite befindet). Beim Eintauchen ist darauf zu achten, dass sich vor der Linse keine Luftblase befindet (beim Eintauchen das Modell schräg halten).

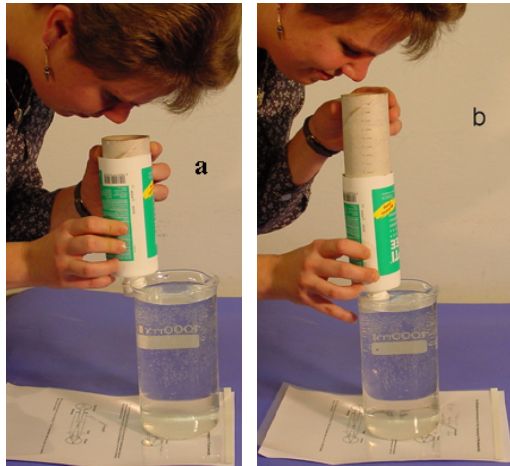


Bild 4.4.3.8: Ein in Luft scharfes Bild (a) kann man in Wasser (b) nicht mehr scharf sehen.

Dies zeigt, dass das Medium Wasser gegenüber dem Medium Luft eine Verminderung der Brechkraft der Linse (bzw. der Hornhaut in einem natürlichen Auge) bewirkt. Übertragen auf das menschliche Auge bedeutet dies, dass die Akkommodation der Linse nicht mehr ausreichend ist. Sie müsste durch eine dickere, nahezu kugelförmige Linse wie bei den meisten Fischen ersetzt werden.

### 4. Vergrößern der Brechkraft der Linse (Fischaugen)

Um eine fast kugelförmige Linse zu erhalten legen die Schülerinnen und Schüler auf die bereits eingebaute Linse eine zweite mit einer Brennweite von 4,9 cm, und zwar so, dass die beiden ebenen Seiten aufeinander liegen. Jetzt lässt sich die Schrift auch durch das Wasser lesen.

### 5. Zwei ergänzende Versuche zur Demonstration der Reduzierung der Brechkraft einer Linse unter Wasser

Die folgenden Versuche sollen die starke Reduktion der Brechkraft einer Sammellinse unter Wasser veranschaulichen.

1) Bild 4.3.3.9a zeigt die benutzten Materialien für den ersten Versuch:

- Ein Gefäß fast vollständig mit Wasser gefüllt, in dem eine kleine Menge von Fluorizin das Lichtbündel sichtbar macht,
- eine Taschenlampe als Lichtquelle,
- ein Ring, der die Linse im Gefäß hält,
- eine plankonvexe Sammellinse.

Gut geeignet ist eine Linse mit großem Durchmesser (z. B.  $>10$  cm) und kleiner Brennweite ( $< 5$  cm). Das von der Taschenlampe kommende divergente Lichtbündel geht durch die plankonvexe Sammellinse in das Wasser. Befindet sich die Krümmung der Linse in Luft (Wölbung der Sammellinse nach oben), so ist die Brechkraft groß (Bild 4.4.3.9b). Nun gießt man etwas Wasser nach, so dass die Sammellinse gerade mit Wasser bedeckt ist. Jetzt beobachtet man eine deutliche Verschiebung des Schnittpunkts des Lichtbündels (Bild 4.4.3.9c). Da die Sammellinse und Wasser vergleichbare Brechzahlen haben, ist die Brechkraft der Linse unter Wasser deutlich geringer als in Luft.

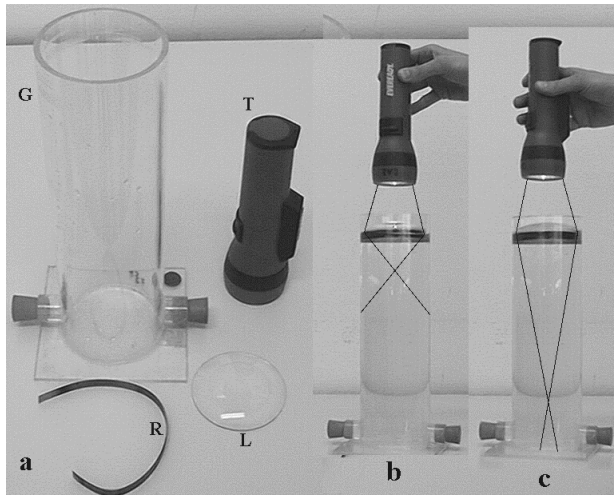


Bild 4.4.3.9: Aufbau des Demonstrationsversuchs zur Reduktion der Brechkraft einer Sammellinse unter Wasser. In a sind die benutzten Materialien dargestellt. In c wird die Brechkraft der Linse von dem darüberliegenden Wasser vermindert und der Lichtkegel wird länger als in b.

## 2) Erklärung des Augenmodells für den zweiten Versuch (siehe auch Einheit 4.4.1):

Als Augenmodell benutzt man das schon beschriebene (Bild 4.4.1.8) Modell oder folgende Variante.

Als Augenkörper dienen zwei durchsichtige Plastikhalbkugeln mit einem Durchmesser von ca. 10 cm (Bild 4.4.3.10). In die eine Hälfte bohrt man mit einem Kronenbohrer ein Loch von etwa 2,5 cm. Die Innenseite der Halbkugel wird mit schwarzer Farbe angestrichen. Hinter die Öffnung wird eine Plastiklinse mit einer Brechkraft von etwa 5 dpt geklebt. Diese entspricht der brechenden Hornhaut. Durch eine weitere Bohrung (schräg bohren!) wird der Schlauch der Gummilinse nach außen geführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Gummilinse parallel zur Plastiklinse steht! In der Mitte der zweiten Halbkugel wird an der Innenseite ein Bereich von etwa 5 cm Durchmesser mit sehr feinem Sandpapier aufgeraut. Dieser Teil wirkt als Mattscheibe, auf der das Bild beobachtet werden kann. Der andere Teil der Innenseite wird mit schwarzer Farbe angestrichen. Wenn man will, kann man die Außenseite (natürlich außer Linse und Mattscheibe) mit weißer Farbe anstreichen und mit Filzstift Blutgefäße andeuten.



Bild 4.4.3.10: Akkomodierenfähiges Augenmodell zur Demonstration der Verringerung der Brechkraft einer Linse unter Wasser

Man legt ein beschriebenes Blatt Papier unter den Behälter mit Wasser und versucht den Text zu lesen. Zu Beginn des Versuchs befindet sich die Plastiklinse über dem Wasser in Luft. Man kann die Dicke der veränderbaren Linse so anpassen, dass ein scharfes Bild zu sehen ist. Man füllt nun über die Spritze Wasser in den Behälter, so dass sich die Plastiklinse des Augenmodells im Wasser befindet. Der Text verschwindet und die Veränderung der Dicke der Linse reicht nicht mehr aus, um ein scharfes Bild zu erhalten.

### **Fragen zur Übung und Vertiefung**

- 1) Wie ändert sich die Gesamtbrechkraft des Auges beim Eintauchen in Wasser?
- 2) Verschiebt sich der Brennpunkt unter Wasser in Richtung der Linse oder in entgegengesetzter Richtung?
- 3) Sieht man unter Wasser besser, wenn man normalsichtige, kurzsichtige oder weitsichtige Auge besitzt?
- 4) Sehen junge oder ältere Leute unter Wasser besser?
- 5) Ändert sich die Brechkraft eines Auges bei der Benutzung einer Tauchermaske?
- 6) Sieht ein fehlsichtiger Mensch gut, der seine Brille unter Wasser trägt?

### **Antworte**

- 1) Unter Wasser sinkt die Gesamtbrechkraft stark ab, weil der Brechungsindex von Wasser und der der Hornhaut nicht sehr unterschiedlich sind.
- 2) Unter Wasser verschiebt sich der Brennpunkt wegen der Brechungssenkung nach hinten.
- 3) Das kurzsichtige Auge, dessen Brennpunkt vor die Netzhaut fällt, sieht unter Wasser besser als das normalsichtige Auge. Das weitsichtige und altersichtige Auge sieht hingegen schlechter.
- 4) Junge Leute sehen unter Wasser besser, weil sie eine stärkere Brechkraft einsetzen können.
- 5) Mit einer Tauchermaske bleibt die Oberfläche der Hornhaut in Kontakt mit der Luft und die Brechkraft des Auges wird daher nicht vermindert.
- 6) Die Brille verliert unter Wasser fast die ganze Brechkraft. Ein fehlsichtiger Mensch sieht daher so, wie wenn er keine Brille trägt.

## 4.5 Weitere einsetzbare Themen

Die folgenden vier Themen wurden für den Unterricht noch nicht im Detail aufbereitet und erprobt. Es sollte aber keine Schwierigkeit sein, sie erfolgreich im Unterricht umzusetzen.

### 4.5.1 Das Stethoskop<sup>1</sup>

Dieses einfache medizinische Diagnoseinstrument ist jedem Kind bekannt und gewissermaßen das Berufskennzeichen der Ärzte.

Die Schülerinnen und Schüler sollen dabei lernen, wo im Körper Schall erzeugt wird und wie er übertragen wird. Im Rahmen der Unterrichtseinheit vertiefen die Schüler und Schülerinnen ihr Wissen über Schallerzeugung, Schallausbreitung und stehende Schallwellen und erfahren dabei einiges über den Aufbau und die Funktion des Herzens.

#### A. Basiswissen über Stethoskop und Herztöne

##### Das Stethoskop

Das Stethoskop wurde von dem Arzt Laennec im Jahre 1816 erfunden, als er mit einer schweren Herzerkrankung einer Patientin konfrontiert war, aber auf Grund der damaligen Moralgesetze ihren Brustkorb nicht direkt abhören durfte. Seit diesem Zeitpunkt wurden viele medizinische Instrumente, Geräte und komplizierte Apparate entwickelt, das Stethoskop jedoch blieb als relativ einfaches Diagnosegerät weitgehend unverändert bis heute erhalten.

Die ersten Stethoskope waren einfache Holz- oder Metallröhren mit trichterförmigen Öffnungen an beiden Enden. Heute bestehen medizinische Stethoskope im allgemeinen aus einem Bruststück zur Aufnahme der Schallwellen; einem Schlauchsystem, in dem die Schallwellen

vom Bruststück zu den Ohren des Trägers übertragen werden und den Ohröfen (Bild 4.5.1.1).

Das Schlauchsystem ist meistens ein flexibles Rohr, das mit dem Bruststück verbunden ist, wobei ein Y- oder ein T-Stück den erforderlichen Kanal zu jedem Ohr bildet.

Es gibt auch Stethoskope, die mit zwei Bruststücken ausgestattet sind, die über zwei voneinander unabhängige Schlauch-



Bild 4.5.1.1: Zwei Formen von Stethoskopen

systeme den Schall jeweils zu einem Ohr leiten. So ist es möglich, gleichzeitig von zwei verschiedenen Körperstellen Schallphänomene wahrzunehmen und auf Grund des simultanen Hörens beider Phänomene einen direkten, unmittelbaren Vergleich zu haben.

In weiterer Folge sind Stethoskope entwickelt worden, bei denen das akustische Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt, gefiltert und verstärkt wird und dann zu den Kopfhörern weitergeleitet wird. Diese Elektrostethoskope eignen sich, sofern der Anschluss mehrerer Kopfhörer vorgesehen ist, für gleichzeitiges Abhören des Herzschalls durch mehrere Personen, z. B. für Unterrichtszwecke.

Dann gibt es noch Apparate, die auf demselben Funktionsprinzip basieren (Registrierung von Schallwellen), aber eine zusätzliche Ausrüstung besitzen, um die Signale zu verarbeiten, mit anderen Signalen zu vergleichen und aufzuzeichnen. Diese werden aber nur in gut ausgestatteten Praxen verwendet.

<sup>1</sup> Teile der Einheit wurde bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (1999c)].

## Das Herz und die Herztöne

Das Herz besteht aus vier Hohlräumen (Bild 4.5.1.2): rechter Vorhof (rV) und rechte Herzkammer (rH), linker Vorhof (lV) und linke Herzkammer (lH). Auf beiden Seiten befindet sich zwischen Vorhof und Kammer jeweils eine Klappe (Atrioventrikularklappen (a)), zwei weitere Klappen liegen in den beiden großen Ausflussbahnen des Herzens (Semilunarklappen (b)).

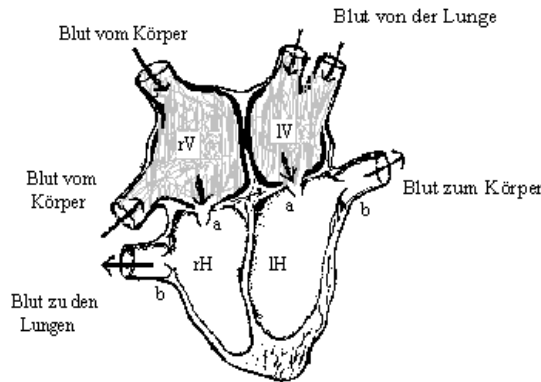


Bild 4.5.1.2: Schema eines Herzen

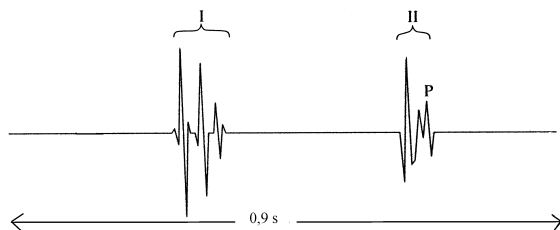


Bild 4.5.1.3: 1. und 2. Herzton eines normalen Phonokardiogramms während eines Herzzyklus (das Grundrauschen ist eliminiert)

Das Herz erzeugt bei seinem Pumpvorgang verschiedene Geräusche. Die beiden stärksten bezeichnet man als 1. und 2. Herzton (Bild 4.5.1.3). Diese Herztöne werden durch den Klappenschluss verursacht. Die Klappenöffnung erfolgt normalerweise lautlos. Der 1. Herzton entsteht beim gleichzeitigen Schluss der Atrioventrikularklappen zu Beginn der Kammerkontraktion. Der 2. Herzton entsteht durch Schluss der Semilunarklappen (Aorten- und Pulmonalklappen) am Ende der Kammerkontraktion. Der Beitrag der linken Herzseite zu den produzierten Herztönen ist größer, weil der Blutdruck, der die Herzklappen schließt, höher ist.

Andere Herzgeräusche außer den definierten Herztönen treten dann auf, wenn das Blut keine normale Dynamik hat [Paquet (1993)]. Das kann z.B. auf Grund eines Herzklappendefekts sein: Wenn die Aortenklappe verengt ist (Aortenstenose), so entsteht im Blut, das während der Kammerkontraktion (Systole) durch diese Klappe strömt, eine starke Turbulenz, die sich in einem an- und abschwellenden Geräusch bemerkbar macht. Schließt die Aortenklappe unvollständig (Aorteninsuffizienz), so strömt während der Entspannungsphase (Diastole) Blut in die Kammer zurück.

## Herzauskultation

Beim Abhören untersucht man den Ablauf der zyklischen Herzaktivität. Voraussetzungen sind die Verwendung eines geeigneten Stethoskops und die richtige Auswahl der Auskultationsorte.

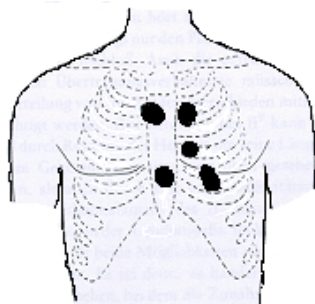


Bild 4.5.1.4: Auskultationsstelle der Herzklappentöne

Der Arzt setzt das Stethoskop normalerweise an 5 bestimmten Orten der Thoraxvorderwand an, wo man am besten die Herzklappentöne hören kann (Bild 4.5.1.4).

Den 1. und 2. Herzton kann man leicht hören. Neben diesen Tönen kann man bei Kindern und Jugendlichen oft noch einen dritten, tieferen Herzton hören, der in diesem Alter normal sein kann. Alle von diesen Tönen abweichenden Schallphänomene können krankhaft sein und werden als "Herzgeräusche" bezeichnet.



## B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung

### Einführung

Als Hinführung zum Thema kann man erfragen, wozu ein Arzt das Stethoskop in der täglichen Praxis verwendet. Dann werden in einfachen Versuchen Körpergeräusche mit Hilfe des Stethoskops abgehört.

### Das Abhören der Herztöne

Mit einfachen Mitteln kann man die 1. und 2. Herztöne hören [Zeitter (1993); Bergmann (1982)]. Mit Hilfe eines Trichters und eines Schlauchs überträgt man den Schall vom Brustkörper zu einem Mikrophon (das Mikrophon kann auch direkt im Trichter angebracht sein). Das Signal des Mikrophons wird verstärkt und zu einem Lautsprecher geleitet (Bild 4.5.1.5). Trichter und Schlauch sollten aus einem harten Material (hoher Wellenwiderstand) sein, so dass die aufgenommenen Schallwellen im Inneren reflektiert werden, und weder vom Material absorbiert werden noch an die Umgebung verloren gehen. Außerdem stören Geräusche aus der Umgebung nicht.

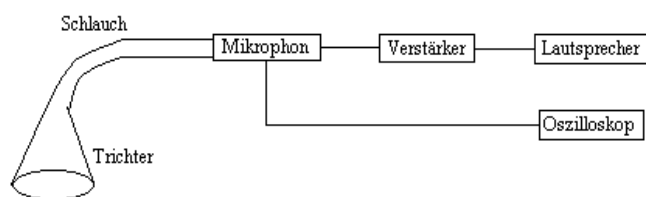


Bild 4.5.1.5: Geräteanordnung für das Abhören und Aufzeichnen der Herztöne

Ist ein Oszilloskop vorhanden, kann man das Signal auch visualisieren und eine Spektralanalyse durchführen und die Tonfrequenzen bestimmen.

### Stehende Schallwelle

Mit diesem Versuch kann man zeigen, dass die Länge eines Schlauches bei der Übertragung einer Welle eine Rolle spielt.

Man führt das Experiment durch, indem man mit einem Tongenerator Töne verschiedener Frequenz produziert und diese mit einem Mikrophon, das sich am anderen Ende des Rohres befindet, aufnimmt (Bild 4.5.1.6). Dieses Signal wird danach mit einem Oszilloskop sichtbar gemacht. Bei Frequenzen, die den Resonanzfrequenzen des Rohres entsprechen, werden im

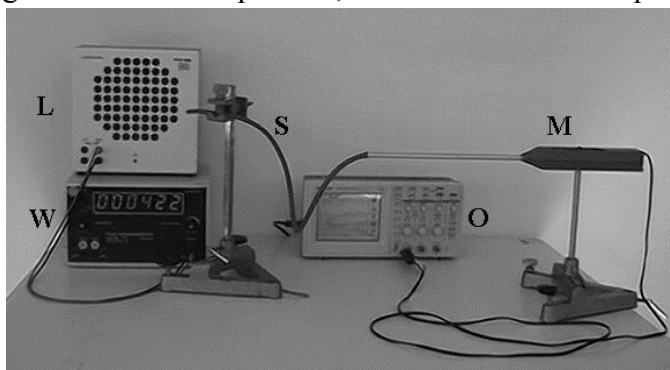


Bild 4.5.1.6: Geräteanordnung, um stehende Wellen in einem Rohr zu erkennen: L Lautsprecher, W Tongenerator, S Schlauch, O Oszilloskop, M Mikrophon.

Rohr stehende Wellen produziert und der Schall wird effizient an das Mikrophon transportiert. Schallwellen mit Frequenzen, die nicht den Resonanzfrequenzen des Rohres entsprechen, produzieren keine stehenden Wellen und gelangen mit wesentlich geringerer Intensität ans Mikrophon.

Das Experiment könnte man auch mit einer festen Frequenz und verschiedenen Rohrlängen durchführen. Dabei würde man dasselbe Verhalten beobachten.

### Direkter und indirekter Weg zum Ohr

Mit diesem Versuch kann gezeigt werden, dass Geräusche, die durch ein Stethoskop geleitet werden, nicht genauso klingen wie Geräusche von der gleichen Schallquelle, wenn sie auf direktem Weg ins Ohr gelangen. In Bild 4.5.1.7 zeigen die zwei Kanäle eines Oszilloskops die elektrischen Signale, die von Mikrophon (unten) und Mikrophon + Stethoskop (oben) kommen. Die Signale sind nicht gleich, weil das vom Stethoskop empfangene Geräusch noch

zusätzlichen Reflexionen, Resonanzen und Absorptionen ausgesetzt war. Die Frequenzen, aus denen ein Geräusch zusammengesetzt ist, ändern sich nicht. Aber Teile des Spektrums können in der Intensität abgeschwächt werden oder ganz verschwinden und so ein neues Geräusch ergeben.

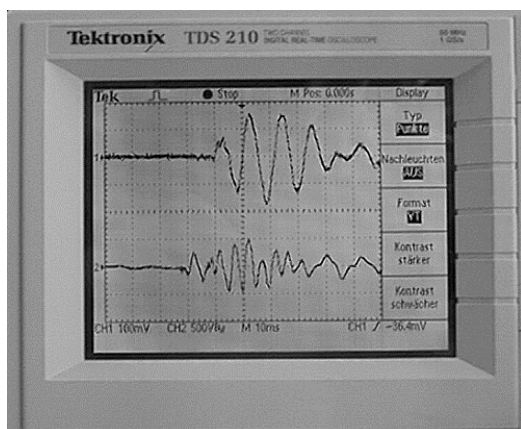


Bild 4.5.1.7: Das von der gleichen Schallquelle kommende Geräusch wird unterschiedlich empfangen, je nachdem ob es nur durch das Mikrophon (unten) oder durch ein Stethoskop und das Mikrophon (oben) geleitet wird.



## 4.5.2 Körpertemperatur und Wärmeübertragung<sup>1</sup>

Die physiologischen Prozesse in unserem Körper und in Tieren hängen entscheidend von der Temperatur ab. Die Körpertemperatur liefert deshalb wichtige Hinweise für viele Fragen rund um die Gesundheit. So laufen bei Körpertemperaturen von oberhalb 43°C irreversible Veränderungen bei Eiweißmolekülen ab. Daher erscheint es sinnvoll über den Wärmehaushalt Bescheid zu wissen. Im Physikunterricht bietet es sich an, im Rahmen der Behandlung von Temperatur und Wärme, auch auf den Wärmehaushalt des Menschen einzugehen.

Die Schülerinnen und Schüler sollen den Unterschied zwischen Temperatur und Wärme vertiefend diskutieren, sowie die verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeübertragung kennen lernen: Sie sollen einsehen, dass die Verdunstung (Transpiration) bei Menschen eine notwendige Wärmeabgabe darstellt und sie sollen erkennen, dass Energie umgewandelt wird, aber nicht verloren geht.

### A. Basiswissen über Wärmehaushalt und Körpertemperatur

#### Wärmehaushalt

Zur Aufrechterhaltung der Körperfunktionen laufen im Organismus Prozesse ab, bei denen die chemische Energie, die durch den Abbau der aufgenommenen Nahrungsmittel gewonnen wird, in andere Energieformen umgewandelt wird. Dies ist jedoch ein Prozess, der entsprechend dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, mit Wärmebildung einhergeht. Damit die Körpertemperatur konstant bleibt, was für warmblütige Lebewesen (darunter Menschen) wichtig ist, muss die produzierte Wärme in kontrollierten Mengen an die Umgebung abgegeben werden. Da der Temperatenausgleich von warmen zu kalten Regionen stattfindet, wäre es günstig, wenn die Umgebungstemperatur etwas niedriger als die Körpertemperatur wäre. Aber die Umgebungstemperatur ändert sich zeitlich und räumlich. Außerdem ändert sich je nach Körperanstrengung die im Körper produzierte Wärme. Deswegen haben Menschen und Warmblüter verschiedene Möglichkeiten entwickelt, um den Wärmehaushalt zu regulieren.

Im Laufe der Evolution haben sich die Lebewesen optimal an ihre Umgebung angepasst und in jedem Ökosystem haben sie versucht, die Gesetze der Physik zu ihrem Vorteil auszunützen. In den kalten Regionen der Erde besitzen Tiere meistens eine gut isolierende Schicht - ein dickes Fell oder eine dicke Fettschicht, um große Wärmeverluste zu vermeiden. Ihre exponierten Körperteile wie Ohren oder Schwänze sind meist klein. Die Tiere selbst sind groß und rundlich, damit das Verhältnis Oberfläche, durch die die Wärme hauptsächlich verloren geht, zu Masse, in der die Wärme produziert wird, klein ist.

Tiere, die in warmen Ländern leben, besitzen hingegen Möglichkeiten, die Wärmeabgabe zu steigern, zum Beispiel durch Verdunstung von Schweiß oder durch den Feuchtigkeitsverlust während der Atmung.

Die Menschen haben immer mehr künstliche Mittel wie Kleidung, Heizung oder Klimaanlage zur Wärmeregulation entwickelt und die biologische Fähigkeit zur Wärmeregulation ist daher immer geringer geworden. Denn wenn die natürlichen Regulationsmechanismen immer mehr entlastet werden, so bildet sich auch die Fähigkeit, den Wärmehaushalt selbst zu regulieren, immer mehr zurück [Schmidt-Nielsen (1997)].

#### Temperatur und Wärme im Körper

Die Zellen der meisten Säugetiere haben sich so sorgfältig an eine einregulierte Temperatur angepasst, dass bereits eine Veränderung der Körpertemperatur um wenige Grade gefährliche Auswirkungen haben kann.

---

<sup>1</sup> Teile der Einheit wurde bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (1998)].

Die Temperatur im Körperinneren nimmt im allgemeinen von den großen Lebewesen (36 °C) bis zu den kleinen Arten von Lebewesen etwas zu (bei kleinen Vögeln erreicht sie 41 °C). Auch Kleinkinder haben eine höhere Temperatur (bis zu 1 °C höher) als Erwachsene.

Die relativ hohe Körpertemperatur des Menschen von ca. 37 °C wird durch die Freisetzung von Wärme bei metabolischen Prozessen (Stoffwechselprozessen) aufrecht erhalten. Die Energieumwandlung im Organismus erreicht einen Nutzeffekt (Wirkungsgrad)  $\eta$  = erbrachte Leistung/umgesetzte Energie unter 30 % [Thews (1999)]. Die Entstehung der Wärme erfolgt, auch wenn unterschiedlich stark, in allen Zellen des Körpers. Bei einem Körper im Ruhezustand wird der größte Teil der Wärme (70 %) von den inneren Organen und dem Kopf gebildet, auch wenn diese Körperteile nur ca. 10 % der gesamten Masse darstellen. Bei anstrengender Tätigkeit kann hingegen auch bis zu 90 % der Wärme von den Muskeln erzeugt werden. Die Wärmeleistungen betragen Werte von etwa 80 W im Ruhezustand und bis 600 W bei Maximalbelastung. Eine Leistungssteigerung findet unter Einfluss von vielen Faktoren (niedrige Umgebungstemperaturen, Muskularbeit, Nahrungsaufnahme, psychische Anspannung, etc.) statt.

Damit die Körpertemperatur konstant bleibt, muss der vom Körper produzierte Wärmestrom  $I_m$  plus der Wärmestrom, der von der Umgebung auf den Körper übertragen wird, gleich dem Wärmestrom sein, der vom Menschen an die Umgebung abgegeben wird. In einfacher Weise kann man schreiben:

$$I_m = I_K + I_S + I_T + I_L$$

Ist die Umgebungstemperatur höher als die Körpertemperatur, wird der Wärmestrom für die Konvektion  $I_K$  negativ (d. h. Wärme geht von der Umgebung in den Körper über). Der Wärmestrom  $I_S$  für die Strahlung ist ebenfalls negativ, wenn sich der Körper im Einfluss warmer, strahlender Körper (Sonne, Ofenwände etc.) befindet. Die Wärmeströme  $I_T$  für die Transpiration, sowie der kleine Betrag  $I_L$  für die Verdunstung in den Lungen, sind hingegen immer positiv.

### Temperaturverteilung im Körper

Die Temperatur im menschlichen Körper weist von Ort zu Ort relativ starke Unterschiede auf (Bild 4.5.2.1). In warmer Umgebung (35 °C) reicht die Temperatur im Körperinneren (37 °C) bis dicht unter die Haut. Die Haut besitzt immer eine niedrigere Temperatur als das Körperinnere, auch bei höherer Umgebungstemperatur, damit Wärmeabgabe von innen nach außen stattfinden kann. Dies wird durch Transpirationsprozesse erreicht.

In der Kälte sinkt die Temperatur in der Körperschale, während die Körperkerntemperatur auf 37 °C gehalten wird. Die Haut der Stirn bleibt immer relativ gleichmäßig durchblutet. Sie ist deshalb ein guter Indikator für die Kerntemperatur bzw. für eine orientierende Prüfung, ob ein Kind Fieber hat.

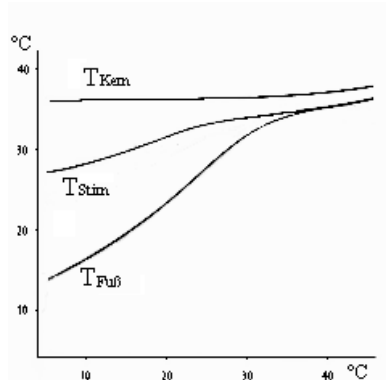


Bild 4.5.2.1: Temperatur bei verschiedenen Umgebungstemperaturen im Kern, an der Stirnhaut, und an der Fußhaut in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

[nach Schmidt (1997)].

## Die vier wichtigsten Arten des Wärmeverlustes bei Menschen

Der Wärmeverlust bei Menschen erfolgt durch Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung und Verdampfung. Die Anteile der einzelnen Komponenten verändern sich stark mit den Umgebungsbedingungen.

### 1) Wärmeverlust durch Wärmeleitung

Die Wärmeleitung, bei der sich die Energie ohne Bewegung der Materie von Molekül zu Molekül überträgt, spielt beim Wärmeverlust des Körpers direkt an die Umgebung praktisch keine Rolle, sie hat aber eine Bedeutung für die Übertragung der Wärme vom Körperinneren zur Körperoberfläche und durch die Kleidung zur Umgebung.

Wärmeverlust durch Wärmeleitung tritt direkt an die Umgebung auf, wo Körperteile in Kontakt mit einem kälteren festen Körper kommen, z. B. Fußsohlen auf dem Boden. Hat der feste Körper eine hohe Wärmeleitfähigkeit bzw. eine platte Oberfläche (wenig Luft zwischen Körper und Boden), damit die Wärme schnell weiter fließen kann, so hat man beim Berühren das Gefühl, dass er kälter als die Umgebung ist, so dass z.B. Marmorboden kälter als Teppichboden zu sein scheint.

### 2) Wärmeverlust durch Konvektion

Der Wärmeverlust durch Konvektion kann in einem Gas oder in einer Flüssigkeit stattfinden. Gas und Flüssigkeit in der menschlichen Umgebung sind im Wesentlichen Luft und Wasser. Im Körper selbst ist das fließende Blut wegen seiner hohen Wärmekapazität ein wichtiges Transportmittel für die Wärme.

#### 2a) Wärmetransport durch den Blutkreislauf

Zur Wärmeabgabe muss die im Körperinneren produzierte Wärme bis an die Oberfläche transportiert werden. Da die Wärmeleitfähigkeit des Körpergewebes gering ist ( $\lambda_{\text{Fett}} = 0,2 \text{ W/m K}$ ;  $\lambda_{\text{Muskel}} = 0,4 \text{ W/m K}$ ;  $\lambda_{\text{Blut}} = 0,5 \text{ W/m K}$  und  $\lambda_{\text{Wasser}} = 0,6 \text{ W/m K}$ ), sorgt vor allem der Blutkreislauf für den Wärmetransport. Auf Grund seiner höheren spezifischen Wärme ist das Blut in der Lage, die in einzelnen Organen gebildete Wärme auf den Gesamtorganismus zu verteilen.

Das Blut wird im Körperinneren erwärmt und durch die Arterien bis unter die Haut gepumpt. Dabei gibt es einen Teil der Wärme ab. Dann fließt es durch die Venen zum Herzen zurück, damit der Zyklus wieder von vorne beginnen kann. Durch diesen konvektiven Wärmetransport ist eine ausreichende und kontrollierte Wärmeabgabe möglich.

#### 2b) Wärmeverlust in Luft durch Konvektion

Eine empirische Näherungsgleichung für den Wärmeverlust durch Konvektion ist

$I_K = \alpha_K \cdot A \cdot \Delta T$  bei der  $I_K$  der thermische Strom ist, der durch eine Oberfläche  $A$  transportiert wird,  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur und der Temperatur eines Punktes, der weit weg von der Oberfläche liegt und  $\alpha_K$  der Wärmeübergangskoeffizient. Letzterer ist schwierig zu ermitteln, denn er hängt von der Art und der Dynamik des Fluidums sowie von der Geometrie der Oberfläche ab.

Betrachtet man den Wärmeverlust des Menschen in kalter Luft, so wird dieser Wärmeverlust hauptsächlich durch Konvektion verursacht. Die Luftschicht, die mit der Haut direkt in Berührung kommt, wird angewärmt. Die Erwärmung der hautnahen Luftschicht bewirkt eine Verkleinerung des Temperaturunterschieds zwischen Haut und Umgebungsluft und der Wärmeverlust wird kleiner. Wegen der schlechten Wärmeleitung von Luft sinkt daher der Wärmefluss in unbewegter Luft sehr schnell ab. Ist der Mensch bekleidet, so wird diese körpernahe Luftschicht durch die Kleidung besser festgehalten und vergrößert somit die Wärmedämmung.

Diese wärmeisolierende, körpernahe Luftschicht wird in bewegter Luft, insbesondere bei kaltem Wind, immer wieder weggeblasen. Der Wind bewirkt also, dass ständig kalte Luft an die Hautoberfläche gelangt. So bleibt die Temperaturdifferenz groß und entsprechend groß ist der Wärmeentzug. Bei einer Lufttemperatur von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  kann z.B. eisiger Wind (Blizzard) dem Körper der Kaiserpinguine am Nordpol so viel Wärme entziehen wie ruhende Luft um  $-180^{\circ}\text{C}$  [Bertsch (1977)].

Um eine bessere Vorstellung zu bekommen, in welcher Größenordnung sich der Wärmeverlust durch Konvektion abspielt, betrachten wir folgendes Beispiel:

Die Haut eines ruhenden Menschen hat eine Temperatur von  $306\text{ K}$  und  $\alpha_K$  eines unbedeckten Menschen beträgt  $7\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ . Bei einer Raumtemperatur von  $292\text{ K}$  und einer Oberfläche des Körpers von  $1,5\text{ m}^2$  beträgt der thermische Fluss durch Konvektion

$I_K = \alpha_K \cdot A \cdot \Delta T = (7\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}) \cdot (1,5\text{ m}^2) \cdot (306\text{ K} - 292\text{ K}) = 147\text{ W}$ , der ca.  $3035\text{ kcal}$  am Tag entsprechen. Dieser Wärmeverlust durch Konvektion ist beträchtlich und entspräche in etwa der Energie, die ein bekleideter Mensch an einem Tag insgesamt benötigen würde.

### 2c) Wärmeverlust in Wasser

Der Wärmeverlust, den Menschen im Wasser erleiden, wird ebenfalls hauptsächlich durch Wärmekonvektion verursacht. Auch bei Wassertemperaturen, die sich nicht viel von der Körpertemperatur unterscheiden, ist der Wärmeverlust groß, weil der Wärmeübergangskoeffizient des Wassers im Vergleich zu Luft etwa 20 mal größer ist.

Um daher den Wärmeverlust gering zu halten, bleibt keine andere Möglichkeit als die Temperatur der Körperoberfläche an die der Wassertemperatur anzugleichen. Tatsächlich werden als Schutzmechanismus die Blutgefäße in den Extremitäten bzw. in den äußeren Körperschichten verengt und somit die Temperatur in den äußeren Körperschichten gesenkt.

Da der Wärmeverlust in kaltem Wasser aber so hoch ist, genügt bei Menschen dieser begrenzte Schutzmechanismus und die ebenfalls begrenzte Stoffwechselsteigerung nicht, um das Absinken der Körpertemperatur zu verhindern, so dass bei Unfällen in nördlichen Meeren insbesondere dünne Menschen im eiskalten Wasser schnell zu Tode kommen.

### 3) Wärmeverlust durch Strahlung

Die von den Säugetieren emittierte Strahlung ist hauptsächlich ferne Infrarotstrahlung. Der Mensch leuchtet daher nicht wie ein elektrischer Heizstrahler, aber er kann durch eine Infrarotkamera gesehen werden.

Die Strahlungsleistung ist nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann  $I_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$ ;  $\sigma$  ist die Stefan-Boltzmann-Konstante und beträgt  $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$ ,  $A$  die Oberfläche,  $\varepsilon$  = Absorptionsfähigkeit (Emissionszahl), sie ist für die Haut in diesem Temperaturbereich etwas kleiner als 1 (0,5-0,8), abhängig von der Pigmentierung der Haut. (Einige Tiere z. B. Chamäleons können zur Steuerung der Wärmeabsorption ihre Körperfärbung rasch ändern).

Die freiwerdende Strahlung spielt eine wichtige Rolle in der Wärmebilanz von Lebewesen, die keine isolierenden Schichten besitzen.

Stellen wir uns einen unbedeckten Menschen vor, der sich in einem kalten Land befindet. Nehmen wir eine Hautoberfläche von  $1,5\text{ m}^2$ , eine Oberflächentemperatur ( $T_0$ ) von  $300\text{ K}$  und eine Umgebungstemperatur ( $T_u$ ) von  $263\text{ K}$  an. Für die freiwerdende Strahlung gilt:

$$I_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_0^4 = 1,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4} \cdot (1,5\text{ m}^2) \cdot (300\text{ K})^4 = 689\text{ W}.$$

Die absorbierte Strahlung ist:

$$I_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_u^4 = 1,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4} \cdot (1,5\text{ m}^2) \cdot (263\text{ K})^4 = 407\text{ W}$$

Die Differenz von  $282\text{ W}$  entspricht ca.  $5830\text{ kcal}$  am Tag. Dieser Mensch würde unter diesen Bedingungen nur durch die Strahlung ca. das doppelte des täglichen energetischen Bedarfs eines bekleideten Menschen verlieren! (Bei bekleideten Menschen ist die Wärmeabstrahlung wegen der niedrigen Temperatur der Kleidungsoberfläche weit geringer.)

Für eine Oberflächentemperatur  $T_0 = 273\text{ K}$ , beträgt der Energieverlust durch Strahlung

$I_e - I_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_o^4 - T_u^4) = 1,5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \cdot 1,5 \text{ m}^2 \cdot (273^4 - 263^4) \text{ K} = 65,4 \text{ W}$ . Dies entspricht einem Wärmeverlust von 1350 kcal am Tag.

#### 4) Wärmeverlust durch Verdunstung

Bei höherer Umgebungstemperatur tragen die besagten Arten der Wärmeübertragung zum Wärmeverlust nicht viel bei. Da die Wärme bei diesen Übertragungen von warm nach kalt fließt, wird der Körper sogar von der Umgebung erwärmt, wenn die Temperatur höher als die Körpertemperatur ist.

In dieser Lage verlässt die Wärme den Körper hauptsächlich durch Transpiration, indem die Hautschweißdrüsen Wasser je nach Bedarf abgeben. Die Körperhaut wird so feucht, dass der Körper Wärme durch wärmeentziehende Verdunstung loswerden kann.

Der Wärmestrom durch Transpiration ist:

$I_T = h_T \cdot (p_s - p_a) \cdot A$ , wobei  $h_T$  die Verdunstungszahl,  $A$  die effektive Hautoberfläche der Verdunstung,  $p_s$  der mittlere Wasserdampfdruck auf der Haut und  $p_a$  der Wasserdampfdruck in der umgebenden Luft ist. Die Wasserdampfdrücke werden von Wassergehalt und Temperatur der Haut bzw. der Luft bestimmt:

Wie man sieht wird die Transpirationsgröße durch das Dampfdruckgefälle bestimmt. Die relative Luftfeuchtigkeit hat daher große Bedeutung für die Transpiration. Je geringer die relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft ist, desto größer ist das Dampfdruckgefälle. Ist Luft mit Wasserdampf gesättigt (z. B. in einer Sauna mit höherer Luftfeuchtigkeit), dann ist die Verdampfung nicht möglich. Die Temperatur eines Menschen, der in dieser Lage (hohe Temperatur und Feuchtigkeit) bleibt, steigt unaufhörlich bis zum Tod. Hingegen führt bei hinreichend trockener Luft auch ein Aufenthalt in 40-45 °C heißer Luft (Wüstengebiete) noch nicht unbedingt zu einem gefährlichen Anstieg der Körpertemperatur.

Die Verdunstung von 1 l Wasser auf der Körperoberfläche entzieht eine Wärme von 2400 kJ. Da die Schweißsekretion Maximalwerte von 4 l/h erreichen kann [Golenhofen (2000)], kann eine Leistungswärmeabgabe von ca. 2,7 kW erreicht werden.

Tiere, die keine Schweißsekretion haben (z. B. Hunde), können Wärme an die Umgebung abgeben, indem die Atmungsfrequenz bzw. die Verdunstung in den Lungen und auf der Zunge erhöht wird. Die höhere Atmungsfrequenz bedingt aber auch eine größere Aktivität der Atmungsmuskeln und produziert daher zusätzliche Wärme, die aber natürlich kleiner ist als die durch diese Maßnahmen insgesamt abgegebene Wärme.

#### Wärmeregulierung und thermische Neutralzone

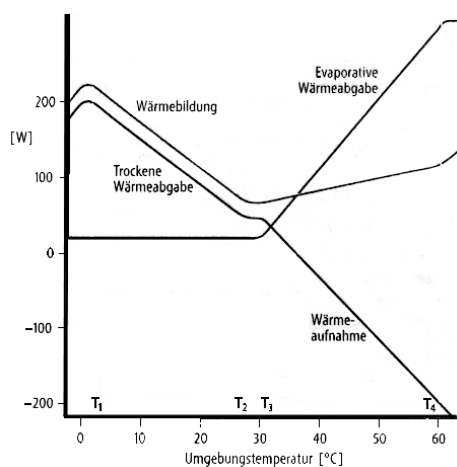


Bild 4.5.2.2: Wärmebildung und Wärmeaustausch in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur  
[nach Thews-Vaupel (1997)]

Die notwendige Beibehaltung einer konstanten Temperatur, insbesondere im Kopf und im Körperrumpf, wo die wichtigen Organe liegen, braucht die Regulierung sowohl der Produktion als auch der Abgabe der Wärme. Bei niedrigen Temperaturen wird eine Erhöhung der Wärmeproduktion hauptsächlich durch freiwillige Bewegung oder unwillkürliche Zunahme der Muskelaktivität (Kältezittern) erreicht. Gleichzeitig werden durch das Verengen der Blutgefäße die äußeren Körperschichten weniger erwärmt und die Temperatur der Hautoberfläche sinkt stark entsprechend der niedrigeren Durchblutung. Bei großer Kälte können Erfrierungen auftreten. Besonders gefährdet sind Körperstellen, die durch Muskeln wenig geschützt sind (Finger, Nase und Ohren) oder Körperteile, die wenig durchblutet werden (Füße, Hände).

Bei Hitze bzw. längeren Bewegungsphasen, wenn die

Muskeln viel Wärme produzieren, finden alle Arten von Wärmeübertragung statt, wobei ein Wärmeverlust je nach gegebener Situation eintritt. Bei ungenügender Wärmeabgabe (oft bei veränderter Schweißbildung z.B. bei höherer Luftfeuchtigkeit oder unzureichender Bekleidung) nimmt die Hautdurchblutung stark zu, was eine Blutverminderung für die übrigen Organe bedeutet (Hitzschlag). Deswegen fällt der Blutdruck ab und wenn die Sauerstoffversorgung des Gehirns unzureichend erfolgt, kann eine Ohnmacht eintreten.

Im Bild 4.5.2.2 ist die Wärmebildung und die mit der Umgebung ausgetauschte Wärme in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für den ruhenden, unbedeckten Erwachsenen dargestellt.

Zwischen  $T_1$  und  $T_4$  (Regelbereich) ist der Körper imstande die Wärmebilanz auszugleichen und die Körpertemperatur auf etwa 37 °C konstant zu halten.

Sinkt die Umgebungstemperatur unterhalb von  $T_1$ , reicht die maximale Wärmeproduktion nicht aus, um den schon verminderten Wärmeverlust auszugleichen. Dann sinkt die Körpertemperatur und man kann bei Kerntemperaturen unter 28 °C durch Atemstillstand oder Herzflimmern zum Kältetod kommen. Der Kältetod kann schneller auftreten, wenn wegen Vasodilatation (Erweiterung der Blutgefäße) die Wärme schneller abgegeben wird (z. B. bei starkem Alkoholkonsum).

Steigt hingegen die Umgebungstemperatur auf Werte über  $T_4$ , kann die gesamte maximale Wärmeabgabe die Wärmeproduktion nicht mehr ausgleichen, dann steigt die Körpertemperatur und es kommt zum Hitzetod.

Zwischen  $T_2$  und  $T_3$  (thermische Neutralzone) liegt das Minimum der Wärmebildung und thermische Behaglichkeit wird empfunden. In diesem Bereich sind Wärmebildung und Wärmeabgabe ohne besondere Eingriffe des Körpers im Gleichgewicht. Es reicht die Anpassung der Hautdurchblutung aus, die Wärmeabgabe auf die gleiche Menge der basalen (minimalen) Wärmebildung zu begrenzen.

Die thermische Neutralzone, die in Luft bei 28-30 °C liegt, ist in Wasser wegen der höheren Wärmeübergangszahl bei 35-36 °C [Schmidt (1997)]. Diese Werte haben keine allgemeine Gültigkeit, denn die thermische Neutralzone hängt individuell von dem Körper (Größe, Schicht von Fett usw.) ab.

Bei Neugeborenen ist die Thermoregulationsfähigkeit fast voll entwickelt, das Verhältnis Oberfläche/Volumen ist aber etwa 3 Mal größer als bei Erwachsenen und die Fettschicht unter der Haut ist dünn. Der Wärmeverlust pro Masse ist daher viel größer. Aus diesem Grund liegt ihre Thermoneutralzone bei einer höheren Umgebungstemperatur (32- 34 °C), auch wenn die Wärmebildung/kg bei ihnen etwa doppelt so groß ist wie bei Erwachsenen [Golenhofen (2000)]. Deswegen sollen Säuglinge sowie auch Kleinkinder, besonders während sie schlafen und die Wärmeproduktion etwas niedriger ist, gut zugedeckt werden.

### **Körpertemperatur und Fieber**

Die Bedeutung der Temperatur für den Ablauf der Lebensvorgänge ist auf ihren großen Einfluss bei chemischen Reaktionen zurückzuführen. Niedrige Temperaturen begünstigen die Erhaltung zellulärer Strukturen, verringern jedoch die Umsatzraten chemischer Reaktionen, die in den Zellen ausgeführt werden. Höhere Temperaturen beschleunigen den Stoffwechsel. Sie können aber auch Strukturen der Proteine und anderer großer Moleküle in den Zellen zerstören.

Die Temperatur im Körper ist eine geregelte Größe. Ihr Sollwert (Idealniveau), beträgt bei Menschen ca. 37 °C [Hedewig (1990)]. Wie bei vielen Regelungen in lebenden Organismen ist der Sollwert keine starr konstante Größe. Z. B. steigt bei Frauen die Basaltemperatur kurz nach der Ovulation um ca. 0,5 °C und bleibt für den Rest des Zyklus erhöht.

Für alle Menschen gilt ein Tagesrhythmus der Temperatur, bei dem die Temperatur während des Schlafens auf einem niedrigeren Wert geregelt wird.

Viele kleine Säugetiere verfallen im Winter in einen Winterschlaf, dabei sinkt die Körpertemperatur auf 5 bis 10 °C, um den Wärmeverlust und daher die Wärmebildung reduzieren zu können.

Eine große Bedeutung hat die Erhöhung der Temperatur bei Infektionen (Fieber). Weil eine höhere Temperatur den Stoffwechsel und damit auch die Produktion der Antikörper beschleunigt und so die Reproduktion der Viren, Bakterien oder Einzeller gehemmt wird. Daher ist Fieber keine selbständige Krankheit, sondern ein Schutz für den Organismus und es sollte, wenn es nur gering ist (38-39 °C), nicht immer und sofort medikamentös unterdrückt werden. Bei hohem Fieber (>40 °C) muss man hingegen eingreifen, weil Fieberkrämpfe auftreten können (oft bei Kindern) und über 43 °C eine irreversible Denaturierung (Gerinnung) einiger Eiweiße des Blutes und Zellplasmas beginnt.

Bevor ärztliche Hilfe eintrifft, haben physikalische Entfieberungsmaßnahmen eine große Bedeutung. Ziel ist es, durch Abkühlung der Hautoberfläche eine größere Wärmeabgabe zu bewirken. Am besten sollte man den Betroffenen von der Kleidung befreien, und seinen Körper mit lauwarmem Wasser waschen bzw. mit Hilfe eines Gebläses abkühlen. Die Zimmertemperatur sollte ungefähr 20 °C betragen.

Bei warmen Beinen werden auch Wadenwickel gemacht. Dabei taucht man zwei Baumwolltücher in zimmerwarmes Wasser, windet sie aus und wickelt sie um die Unterschenkel. Sind Füße und Arme kalt, so ist das ein Symptom von unzureichender Durchblutung und einer beginnenden Kreislautschwäche, dann sollte man auf keinen Fall einen Wadenwickel machen, er würde außerdem keinen Sinn haben. Man macht dann einen kalten Wickel um die Brust oder den Rumpf.

Bei hoher Körpertemperatur wird durch Transpiration und erhöhte Atemfrequenz reichlich Wasser abgegeben, das durch kühle Flüssigkeit ersetzt werden soll, am besten durch Früchte-tees und Fruchtsäfte, die kühl, aber nicht eiskalt sein sollen.

### Stoffwechselrate und Körpergröße

Die Stoffwechselrate ist der gesamte Energieverbrauch eines Lebewesens in einer bestimmten Zeit. Sie reicht von einem minimalen Wert bei Aufrechterhaltung der wichtigsten Körperfunktionen bis zu einem maximalen Wert bei Spitzenleistungen (Schwimmen, Laufen, usw.).

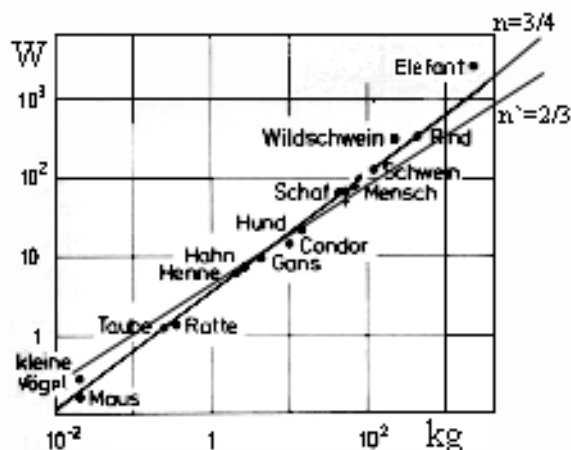


Bild 4.5.2.3: Energieumsatz (W) und Körpermasse (kg) folgen bei Warmblütern einem Potenzgesetz mit dem Exponenten  $n = 3/4$ . Bei Proportionalität zwischen Energieumsatz und Oberfläche würde bei doppelt logarithmischer Auftragung die Gerade mit dem Exponenten  $n = 2/3$  gelten

[aus Harten (1999) und Schmidt (1997) modifiziert].

Kleine Lebewesen verbrauchen im Verhältnis zu ihrer Masse viel mehr Energie als größere Lebewesen. Jedes Gramm einer fünf Gramm leichten Spitzmaus verbraucht etwa hundertmal mehr Energie als jedes Gramm eines vier Tonnen schweren Elefanten.

Welcher physiologische Grund steckt hinter dem umgekehrten Verhältnis von Stoffwechselrate und Körpergröße?

Eine Erklärung basiert auf dem unterschiedlichen Verhältnis Oberfläche/Volumen bei Lebewesen verschiedener Größe. Je größer das Verhältnis Oberfläche/Volumen ist, desto größer ist der Wärmeverlust und desto mehr Energie muss angewendet werden.

Der Grundumsatz (GU) eines Körpers (Energieumsatz unter Ruhebedingungen) lässt sich als Potenzfunktion der Körpermasse beschreiben:

$GU = K \cdot m^{3/4}$ , wobei K eine Konstante und m die Masse ist. Da Masse und Volumen eines Lebewesens proportional sind, ist der Energieumsatz proportional zu  $V^{3/4}$ . Dies gilt von der Maus bis zum Elefanten.

Die Körperoberfläche A, durch die die vom Körper entwickelte Wärme abgeführt werden muss, steigt aber nur proportional zu  $V^{2/3}$  (Bild 4.5.2.3).

Das Verhältnis  $GU/A$  ist proportional zu  $V^{3/4} / V^{2/3} = V^{1/12}$  und nimmt daher mit zunehmendem Volumen zu bzw. bei kleineren Körpern ab.

### **Die Dicke der Isolierkleidung**

Die Menschen haben im Laufe der Evolution die Pelzisolierung verloren. Daher müssen sie vor allem in kälteren Regionen Kleidung tragen.

Die isolierenden Kleidungsstücke dienen in erster Linie dazu, Wärmeverlust durch Wärme-konvektion und Strahlung zu verhindern. Die Isolierungswirkung der Kleidung beruht hauptsächlich auf der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Luft, die in den synthetischen bzw. natürlichen Fasern eingeschlossen ist.

Der Großteil der im Körper produzierten Wärme muss zuerst die Kleidungsschicht passieren, bevor sie an die Umgebung abgegeben wird.

Man kann die Dicke (x) der Kleidung abschätzen, damit die Körperoberflächentemperatur  $T_i$  bei einer bestimmten Umgebungstemperatur ( $T_U$ ) angenehm ist.

Zur Vereinfachung nehmen wir an, dass  $T_K$  (Temperatur an der Außenseite der Kleidung) gleich  $T_U$  ist.

Der Wärmestrom, der durch die Kleidung geht ist

$$I = \lambda A (T_i - T_K)/x$$

Wenn wir  $I = 100 \text{ W}$  (Wärmebildung bei Menschen im Ruhezustand),  $\lambda = 0,04 \text{ W/m K}$  (Wärmeleitfähigkeit von Wolle),  $T_i = 30 \text{ °C}$  und  $T_K = T_U = 10 \text{ °C}$  annehmen, dann ist

$$x = \lambda A (T_i - T_K)/I = (0,04 \cdot 1,8 \cdot 20 / 80) \text{ m} = \text{ca. } 2 \text{ cm}.$$

Selbstverständlich erhöht sich bei Muskelaktivität die Wärmeproduktion, deswegen braucht man bei Bewegung dünnere Kleidung, um die Hauttemperatur auf dem gleichen Wert zu halten.



## B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung

### Einleitung: Gleich- und wechselwarme Lebewesen

Es gibt wechselwarme (poikilotherme, kaltblütige) und gleichwarme (homöotherme, warmblütige) Lebewesen. Bei den ersteren passt sich die Körpertemperatur weitgehend passiv der Umgebungstemperatur an. Kaltblütige Lebewesen können daher am Morgen erst aktiv werden, nachdem sie z. B. von der Sonne erwärmt wurden. Je größer die Umgebungstemperatur ist, desto aktiver sind sie. Warmblütige Lebewesen können hingegen wegen der konstant höheren Körpertemperatur bereits sofort aktiv sein. (Die Stoffwechselprozesse der Zelle nehmen bei einer Temperaturerhöhung um  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  um den Faktor 2 bis 3 zu). Eine höhere konstante Körpertemperatur gibt dann mehr Unabhängigkeit, kostet aber viel Energie insbesondere in einer kalten Umgebung. Beispielsweise besitzt ein ruhender Mensch bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  einen Grundumsatz von etwa  $6000\text{ kJ}$  pro Tag. Im Gegensatz dazu hat ein ruhendes Krokodil ähnlichen Gewichtes bei derselben Temperatur einen Grundumsatz von lediglich  $250\text{ kJ}$  pro Tag.

### Wärmeabgabe und Körperoberfläche

Durch die drei folgenden Versuche kann den Schülern klar werden, dass die Wärmeabgabe von der Größe der Körperoberfläche abhängt.

- Man taucht zwei Körper gleichen Materials und gleicher Masse, aber unterschiedlicher Form (z. B. eine Kugel und ein Modell eines Menschen) in warmes Wasser, damit sie sich auf die gleiche Temperatur erwärmen. Dann nimmt man die zwei Körper wieder heraus und misst die Temperaturänderung bei der Abkühlung. (Am besten benutzt man einen guten Wärmeleiter, damit einerseits die Temperaturänderung schnell erfolgt, und man andererseits das Problem nicht hat, den großen Widerstand der Wärmeleitung von innen nach außen berücksichtigen zu müssen.) Warum kühlt sich der Körper in menschlicher Form schneller ab?
- Nimm 8 Würfel und zähle ihre Seitenflächen (48). Baue aus diesen 8 Würfeln einen großen Würfel zusammen (Bild 4.5.2.4). Wie vielen kleinen Seitenflächen entspricht die Oberfläche dieses großen Würfels? (nur 24). Die Wärme wird durch die Oberfläche abgegeben. Verliert der große Würfel oder alle 8 Würfel zusammen mehr Wärme?

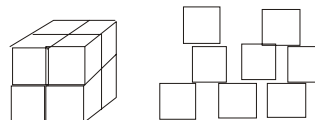


Bild 4.5.2.4: Acht einzelne Würfel haben eine größere Oberfläche als ein aus 8 Würfeln zusammengesetzter großer Würfel.

### Beziehung zwischen Temperatur und Wärme

Die in einem Körper enthaltene Wärme ( $c_w \cdot m \cdot T$ ) bestimmt die Körpertemperatur. Der Organismus hat zwei Möglichkeiten zur Regelung der Körpertemperatur: Die Wärmeproduktion und die Wärmeabgabe. Die Bilder 4.5.2.5 bis 4.5.2.7 zeigen die unterschiedlichen Situationen:

- Die Körpertemperatur bleibt konstant, weil die Wärmemenge im Körper konstant bleibt.

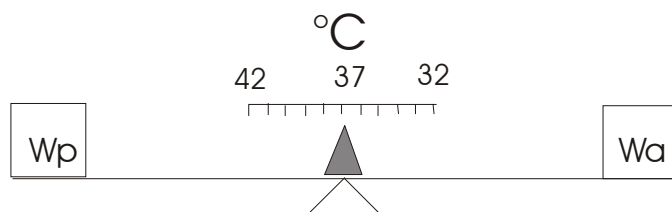


Bild 4.5.2.5: Gleichgewicht von produzierter und eventuell von der Umgebung aufgenommener ( $W_p$ ) und abgegebener Wärme ( $W_a$ ).

2) Die Körpertemperatur steigt, weil die Wärme im Körper zunimmt.

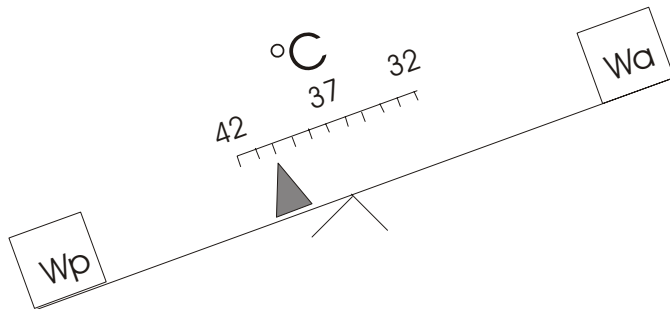


Bild 4.5.2.6: Die produzierte und eventuell von der Umgebung aufgenommene Wärme überwiegt.

3) Die Körpertemperatur sinkt, weil die Wärme im Körper abnimmt.

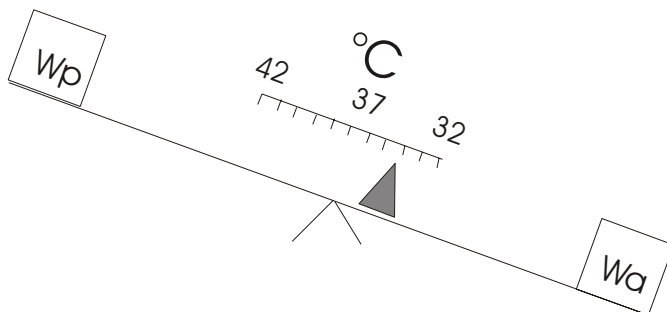


Bild 4.5.2.7: Die abgegebene Wärme überwiegt.

#### *Die Isolierkleidung zur Vermeidung des Wärmeverlusts*

Um den Unterricht interessanter für die Schüler zu machen, kann man zeigen, wie die bekannte „Gore-Tex“-Membran aufgebaut ist, bzw. welche Eigenschaften und Funktionen sie hat.

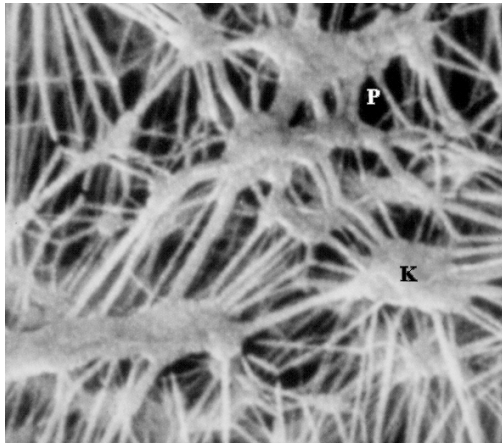


Bild 4.5.2.8: Gore-Tex Membran mit verbundenen Knoten (K) und Poren (P)

Man kann die Struktur einer Gore-Tex Membran anhand von Folien zeigen (Bild 4.5.2.8).

Sie besteht aus miteinander verbundenen Knoten und vielen Poren. Die Poren sind kleiner als ein Wassertropfen aber größer als ein Wasserdampfmolekül. Deshalb kann Wasser nicht eindringen, gleichzeitig jedoch Wasserdampf entweichen.

In Form eines „Sandwich“ mit anderen Membranen, die je nach Anforderungen gewählt werden, kann die Gore-Tex Membran die wichtigen Funktionen einer Kleidung erfüllen: Schutz vor Wasser, Wind und Kälte von außen und Durchlässigkeit der Körperfeuchtigkeit von innen nach außen.

#### *Temperaturänderung bei Körpern*

Man kann Versuche durchführen, die zeigen, wie sich die Temperatur eines Körpers in unterschiedlicher Lage (Stehen, Liegen etc.) ändert [Colicchia & Wiesner (1998)]. In der Mittelstufe könnte man an verschiedenen großen Körpern aus Metall jeweils ein Thermometer anbringen und beobachten bzw. messen wie die Temperaturänderung bei verschiedenen Bedingungen abläuft. Als Körper könnte man auch mit Wasser gefüllte Puppen verwenden, die sicherlich größeres Interesse der Schülerinnen und Schüler auf sich ziehen. Diese Form hat außerdem

den Vorteil, dass sie besser der Realität entspricht. Zu beachten ist aber, dass Wasser eine große Wärmekapazität besitzt. Daher sind die Temperaturänderungen recht klein und erfolgen sehr langsam. Deshalb wird empfohlen, eine relative große Temperaturdifferenz zwischen den Körpern und der Umgebung zu wählen.

### Folgende Fragen können zur Diskussion oder als Aufgabe dienen

1) Welcher Fuchskopf passt in kalte Länder besser? Warum?

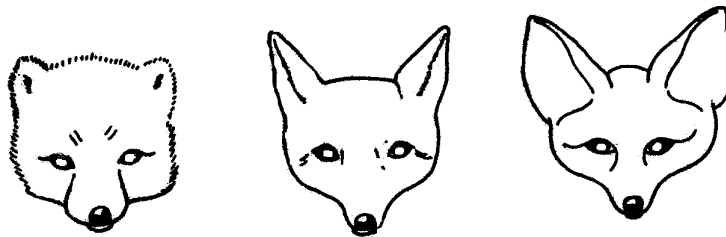


Bild 4.5.2.9:  
Köpfe von Füchsen

2) Welche Pinguine überleben besser in der Kälte?

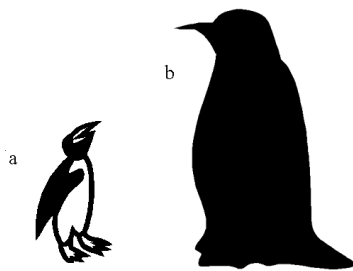


Bild 4.5.2.10: Pinguine

3) Welche Haltung ist für den Vogel in der Kälte geeignet, (a) oder (b)?

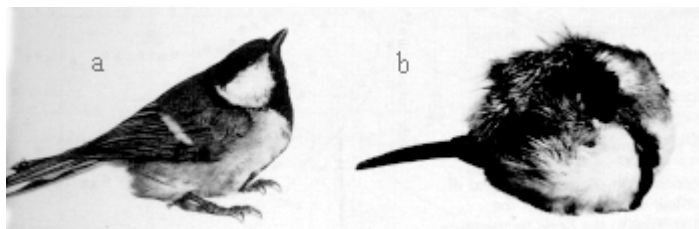


Bild 4.5.2.11: Vogel in warmer (a) und in kalter (b) Umgebung [aus Duke(1997)].

4) Welches der unten dargestellten Wassertiere kann ein Warmblüter sein? Kann dieser Warmblüter sowohl im kalten als auch im warmen Wasser leben?

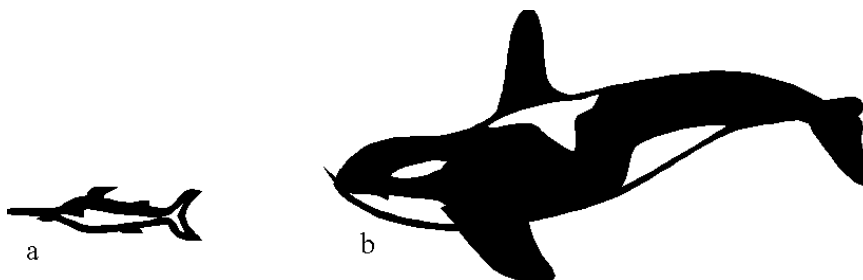


Bild 4.5.2.12: Kleine  
und große Wassertiere

5) Welcher der unten dargestellten Menschen stellt eine Person in kalter Umgebung dar?

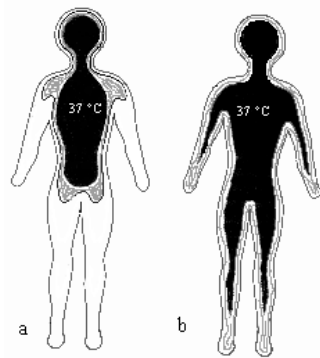


Bild 4.5.2.13: In (a) ist der warme Kern kleiner als in (b).

- 6) Verliert ein Mensch im Wasser mehr Wärme, wenn er sich bewegt oder wenn er ruhig bleibt?
- 7) Überleben bei Unfällen im kalten Wasser eher dicke oder dünne Menschen?
- 8) Wie lang würde ein Mensch (70 kg) infolge seines Grundumsatzes (80 W) leben, wenn der Wärmeaustausch mit der Umgebung völlig verhindert werden könnte?
- 9) Mit welcher Leistung tragen eine Million Menschen zur Wärmesteigerung einer Stadt bei (Schätzung)?
- 10) Warum wird eine in Tassen aufgeteilte Flüssigkeit (z. B. Tee) schneller kalt als in der Karaffe, auch wenn Tassen und Karaffe aus demselben Material sind.
- 11) Warum graben sich einige Tiere am Nordpol unter den Schnee ein, insbesondere wenn das Wetter windig ist?
- 12) Ist es bei Wind besser, eine Kleidung aus großen oder aus engen Maschen zu tragen?
- 13) Wie kann der Körper Wärme abgeben, wenn die Umgebungstemperatur über 37 °C liegt?
- 14) Warum überleben nur große Eisberge so lang, dass man auch noch weit südlich vom Nordpol auf sie treffen kann?

### Antworten

- 1) Der Eisfuchs (a), der kleine Ohren zur Reduzierung der Körperoberfläche und ein dickes Fell zur Verbesserung der Isolation besitzt.
- 2) Der große Pinguin (b), weil das Verhältnis Masse/Körperoberfläche klein ist.
- 3) Die Haltung (b) ist geeignet, um den Wärmeverlust zu reduzieren, weil die sich in den aufgestellten Federn befindende Luft eine Wärmeisolation bewirkt. Außerdem minimiert die Kugelform das Verhältnis Masse/Oberfläche.
- 4) Nur große Wassertiere können Warmblüter sein. Kleintiere würden im Wasser wegen des großen Verhältnisses Masse/Oberfläche einen zu hohen Wärmeverlust haben. Sehr große Tiere (Wale) können auch wegen ihrer isolierenden Fettschicht, die die Wärmeverluste vermeidet, sowohl in den Ozeanen als auch im Eismeer leben.
- 5) Der Wärmeverlust hängt von der Differenz zwischen Körper- und Umgebungstemperatur ab. Menschen reduzieren in kalter Umgebung den Wärmeverlust durch Verkleinerung des warmen Kerns bzw. durch Senkung der Körperoberflächentemperatur, insbesondere in den exponierten Körperteilen (Füße, Hände, Nase, Ohren).
- 6) Ein Mensch im Wasser verliert viel mehr Wärme, wenn er sich bewegt. Denn die ihn umgebende erwärmte Wasserschicht wird beim Schwimmen immer wieder weggestoßen und durch kälteres Wasser ersetzt. Dadurch bleibt die Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und naher Umgebung immer groß. Außerdem führt die von den Muskeln zusätzlich produzierte Wärme zu einer Erhöhung der Körpertemperatur und zu einer Erweiterung der Blutgefäße, die zusätzliche Beiträge zum Wärmeverlust liefern.

- 7) Dicke Menschen überleben eher, weil die Körpertemperatur bei ihnen langsamer sinkt. Das kommt daher, weil das Verhältnis Oberfläche/Volumen kleiner ist und auch das Fett (auf Grund seiner schlechten Wärmeübertragung) isoliert.
- 8) Er würde leben, bis die Körpertemperatur von 37 °C ca. 43 °C erreicht hätte. Wenn wir für den Körper wie für das Wasser die Wärmekapazität  $c_W$  von 4187 J/kg · K annehmen, dann ist:  

$$\Delta T = \Delta Q / c_W \cdot m$$

$$\Delta T = P \cdot t / c_W \cdot m$$

$$t = \Delta T \cdot c_W \cdot m / P = 5 \cdot 4187 \cdot 70 / 80 \text{ s} = 21982 \text{ s} = \text{ca. } 6 \text{ h}$$
- 9) Wenn wir annehmen, dass der Beitrag der Wärmeleistung eines Menschen 100 W ist, dann ist der gesamte Wärmebeitrag (100 W/Mensch) x 1000000 Menschen =  $10^8$  W.
- 10) Weil die Oberfläche aller Tassen größer ist als die laterale Oberfläche der Karaffe.
- 11) Weil die niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Schnees einen großen Wärmeverlust verhindert.
- 12) Aus engen Maschen, sonst tritt der Wind einfach ein und führt Wärme ab.
- 13) Über Verdunstung von Schweiß, wenn die Luft nicht wasserdampfgesättigt ist.
- 14) Ein Eisberg besitzt eine Wärmekapazität proportional zu seiner Masse, während seine Erwärmung durch seine Oberfläche erfolgt. Deswegen schmelzen größere Eisberge langsamer als kleinere.

### 4.5.3 Venöse Infusionen<sup>1</sup>

Den Einsatz von Infusionen und Transfusionen sieht man fast täglich, z. B. im Fernsehen. Viele Schüler sind sicher neugierig zu erfahren, warum bei der Rettung fast immer eine Infusion gelegt wird und wie eine Infusion durchgeführt wird. Viele Gesetze der Schulphysik sind in Antworten auf diese Fragen bzw. in der physikalischen Beschreibung einer Infusion enthalten.

#### A. Basiswissen über Infusionsgerät und Infusionsströmung

##### Geschichte der Blutinfusion

Blut gilt seit altersher als Quelle des Lebens. Sein Verlust bedeutet Tod, seine Zufuhr Nahrung. Man hat geglaubt, durch das Blut von Gladiatoren stärker und vom Kindsblut jünger zu werden. Auch war man der Meinung, durch oftmalige Transfusionen zwischen verschiedenartigen Tieren das eine in das andere umwandeln zu können. Auf zwei Wegen wurde versucht Blut aufzunehmen, einerseits wurde es getrunken, andererseits direkt in die Adern übertragen. Die meisten Transfusionen waren aber erfolglos, bis im Jahre 1901 von Landsteiner die Blutgruppen entdeckt wurden [Strengers (1996)].

Der Infusionsversuch am Menschen begann nach der Entdeckung (1628), dass sich das Blut im Menschen und anderen Lebewesen in einem ständigen Kreislauf befindet, um alle Organe mit den lebenswichtigen Stoffen zu versorgen. So konnte man das Blut auch als Transportmittel für Medikamente verwenden, die dem Körper möglichst schnell und effektiv zugeführt werden sollten. Kuriose Infusionen fehlten aber auch nicht, z. B. durch Infusion einen Hund mit Wein betrunken zu machen [Gabla (1982); Müller-Eckhardt (1988)].

Auf Grund des Fortschrittes in der Medizin und der Verwendung von Standard-Infusionsbestecken hat man seit Beginn des zweiten Weltkrieges immer mehr Anwendungsmöglichkeiten für Infusionen und Transfusionen gefunden. Heute werden durch Infusionen Medikamente, Nährstoffe, Lösungen zur Elektrolytregulierung, zur Wiederherstellung des Säure-Basen-Gleichgewichts oder zum Ausgleich bei Flüssigkeitsverlusten, usw. zum Körpergewebe gebracht. Sie werden vor allem eingesetzt, wenn andere Wege nicht benützt werden können, oder wenn es notwendig ist, die Flüssigkeit schnell im ganzen Körper gleichmäßig aufzunehmen. Diese schnelle Verteilung (20-50 s) von Stoffen im ganzen Körper spielt insbesondere bei Notfallpatienten eine große Rolle.

##### Infusionsgeräte

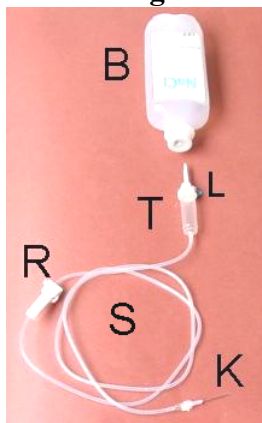


Bild 4.5.3.1  
Infusionsgerät

Infusionsgeräte (Bild 4.5.3.1) bestehen im Allgemeinen aus einem Behälter B, einer Tropfkammer T mit Belüftung L, einem Plastikschlauch S, einer Rollenklammer R und einer Kanüle K.

Infusionsbehälter (von 100 bis 1000 ml) gibt es aus Glas und Kunststoff [Kristel (1995)]. Die Glasflasche ist wegen ihrer chemischen Inertheit für alle Infusionslösungen geeignet. Der Nachteil einer Glasflasche ist ihr hohes Gewicht und dass sie belüftet werden muss. Sonst entsteht in der Flasche ein Unterdruck und der Infusionsfluss wird unterbrochen. Kunststoffbehälter gibt es als Plastikflaschen und -beutel. Sie haben ein niedrigeres Gewicht und wenn sie aus elastischem Material sind, ist keine Belüftung erforderlich. Denn während sie sich entleeren, zieht sich der Behälter zusammen, das Volumen wird kleiner und der innere Druck bleibt immer gleich (ca. 1 bar).

<sup>1</sup> Teile der Einheit wurde bereits veröffentlicht: [Colicchia & Wiesner (1999b)].

Die Tropfkammer (Bild 4.5.3.2) ist eine Kammer aus durchsichtigem Kunststoff, in die aus einer kreisrunden Kapillarenöffnung Flüssigkeit tropft und dann durch den Schlauch zum Patienten weiter fließt. Der Tropfen reißt ab, wenn sein Gewicht  $G = \rho \cdot V \cdot g$  die Haltekraft  $F = 2\pi r \cdot \gamma$  überschreitet, wobei  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit,  $V$  das Volumen eines Tropfens,  $2\pi r$  der Umfang an der Einschnürung und  $\gamma$  die Oberflächenspannung ist. Die Oberflächenspannung kommt durch anziehende Kräfte zustande (Kohäsionskräfte), die die Moleküle aufeinander ausüben. Für Wasser ist sie  $0,073 \text{ N m}^{-1}$  (bei  $20^\circ \text{C}$ ) und sie nimmt mit wachsender Temperatur ab. Wann der Tropfen abreißt hängt vom Durchmesser der Einschnürung ab, dieser wird von dem Durchmesser der Kapillare bestimmt. So

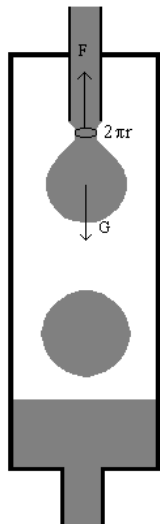


Bild 4.5.3.2  
Tropfkammer

kann man durch die Wahl der Größe der Kapillare auch die Größe des Tropfens bestimmen. Ein Normaltropfenzähler liefert mit 20 Tropfen eine Menge von  $1 \text{ g}$  ( $1 \text{ cm}^3$ ) Wasser. Tropfenzähler mit kleinerer Kapillarenöffnung für Kinder liefern  $1 \text{ g}$  Wasser mit 60 Tropfen. Für diese Relation zwischen Tropfen und Flüssigkeitsmenge, kann eine Tropfkammer zur Kontrolle der Durchflussmenge dienen. Die Zahl der Tropfen ist bei verschiedenen Flüssigkeiten unterschiedlich. Während  $1 \text{ cm}^3$  Wasser bei einem Rohrdurchmesser von  $3 \text{ mm}$  20 Tropfen ergibt, liefert  $1 \text{ cm}^3$  Olivenöl 47 Tropfen und  $1 \text{ cm}^3$  Äther 80 Tropfen [Beier (1973)]. Die Rollenklemme ist ein Durchflussregler, mit dem die Tropfenzahl eingestellt werden kann.

Als Kanülen gibt es Metall- und Plastikkanülen verschiedener Länge und Stärke, sie werden nur einmalig verwendet. Plastikkanülen werden heute häufiger eingesetzt, weil sie sich besser dem Verlauf des Gefäßes und den Bewegungen des Patienten anpassen (sie sind gewebsfreundlicher). Kanülen mit einem Dreivegehahn ermöglichen es, gleichzeitig zusätzliche Medikamente zu verabreichen oder zwei verschiedene Infusionen durchzuführen.

### Infusionsströmung

Bei einer normalen Infusion fließt die Flüssigkeit auf Grund der Schwerkraft vom Behälter in den Körper. Es ist einfach zu verstehen, dass sich der Behälter auf einer Mindesthöhe befinden muss, so dass der erzeugte Druck der Flüssigkeitssäule größer als der Blutdruck in der punktierten Vene ist. Wenn wir den Blutdruck in einer Vene mit  $2 \text{ kPa}$  annehmen, dann muss diese Höhe mindestens  $20 \text{ cm}$  betragen, sonst würde das Blut vom Patienten in den Behälter fließen. Der Behälter wird normalerweise auf eine Höhe von  $60\text{--}100 \text{ cm}$  gehängt, um die Widerstände, die auf die Flüssigkeit vom Behälter bis zum Patienten wirken, zu überwinden. Die benötigte Regulierung der Infusionsgeschwindigkeit wird hauptsächlich durch eine Rollenklemme erreicht, die den Infusionsschlauch verschieden stark komprimiert.

Um ein numerisches Beispiel zu geben, rechnen wir aus, wie hoch der Behälter aufgehängt sein muss, um eine schnelle Transfusion durchzuführen und dabei z. B. eine Volumenstromstärke  $V/t$  des Blutplasmas von  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $= 1 \text{ ml s}^{-1}$ ) zu erreichen. Nehmen wir an, dass die benutzte Kanüle eine Länge  $l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  und einen inneren Durchmesser von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  hat. Nach der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung ist die nötige Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kanüle  $\Delta p = (8 \eta l / \pi r^4) \cdot I$ , wobei wir  $\eta = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  annehmen. Einsetzen der Werte ergibt für  $\Delta p$  ca.  $3 \text{ kPa}$ . Wenn wir der Einfachheit halber die wegen des fließenden Blutplasmas auftretende Druckverminderung im Schlauch bzw. Tropfkammer vernachlässigen, müssen wir nun noch den Druck in der Vene ( $2 \text{ kPa}$ ) addieren. Zusammen ergibt das  $5 \text{ kPa}$ , die einer Höhe von ca.  $0,5 \text{ m}$  entsprechen. Man sollte aber beachten, dass ein langer Schlauch mit kleinem Durchmesser bzw. eine mit einem Filter ausgestattete Tropfkammer einen großen Widerstand haben kann.

Wenn es erforderlich ist, eine große Menge einer Flüssigkeit in kurzer Zeit zu verabreichen, kann man eine Druckinfusion anwenden. Die Durchlaufgeschwindigkeit wird durch in die Flasche gepumpte Luft erhöht. Bei Verwendung eines Plastikbeutels benützt man eine Manschette, um den Behälter zu komprimieren. In jedem Fall soll eine Kanüle mit großem Durchmesser benutzt werden, da gemäß der Hagen-Poiseuilleschen Gleichung die Volumenstromstärke mit der vierten Potenz des Radius wächst.

### Druckverhältnisse längs des Schlauches

Im folgenden nehmen wir an, dass eine ideale Flüssigkeit fließt, die Kanüle K in der Luft hängt und den gleichen Durchmesser wie der Schlauch hat (Bild 4.5.3.3).

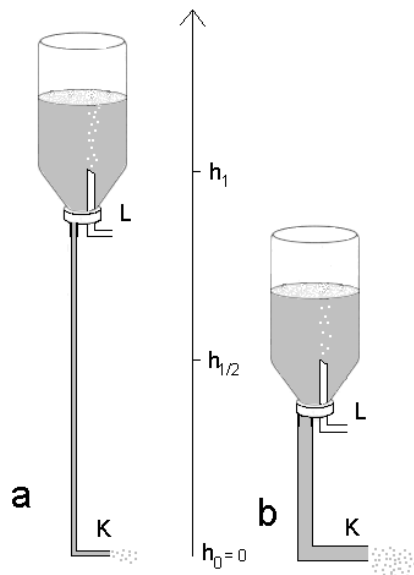


Bild 4.5.3.3: Wird die Infusionsflasche auf halber Höhe aufgehängt (b), aber mit einem Schlauch mit doppeltem Durchmesser als in (a) verbunden, erreicht man eine größere Volumenstromstärke als in (a).

Wegen des Belüftungsrohres L ist der Druck in der Flasche am Ausgang des Belüftungsrohres (Höhe  $h_1$ ) immer gleich dem äußeren Luftdruck  $p_L$ . Wenn die Kanüle geschlossen ist, steigt nach unten der Druck linear an, weil der Schweredruck  $\rho \cdot g \cdot h$  proportional zur Höhe ist. Daher beträgt der Gesamtdruck in der Höhe der Kanüle  $p_L + \rho \cdot g \cdot h_1$ . Wenn man die Kanüle öffnet (Bild 4.5.3.3a), sinkt der Druck an jeder Stelle im Schlauch um den Betrag des sogenannten „dynamischen Drucks“  $1/2 \cdot \rho v^2$  (die Geschwindigkeit  $v$  muss wegen der Massenerhaltung im Schlauch überall gleich groß sein).

Wir wenden das Gesetz von Bernoulli auf die Höhe  $h=0$  (Kanüle) und eine beliebige Höhe  $h$  längs des Schlauches an

$$p_L + 1/2 \cdot \rho v^2 = p(h) + 1/2 \cdot \rho v^2 + \rho g h$$

und erhalten

$$p(h) = p_L - \rho g h.$$

D.h., der Druck ist in der Kanüle gerade so groß wie der äußere Luftdruck, nimmt dann längs des Schlauches linear ab und erreicht an der Anschlussstelle zur Infusionsflasche den kleinsten Wert, der dort deutlich unter dem Luftdruck liegt.

Unter diesen Bedingungen hängt der Fluss von dem inneren Durchmesser des Schlauches und dem hydrostatischen Gefälle zwischen dem Infusionsbehälter und der Kanüle ab. Je größer das Gefälle bzw. der innere Durchmesser des Schlauches ist, desto größer ist die Volumenstromstärke. Es stellt sich nun die Frage, ob es zur Steigerung der Volumenstromstärke besser ist, den Behälter höher zu hängen oder den inneren Schlauch- und den Kanüldurchmesser zu vergrößern (Bild 4.2.4.3b).

Diese Frage kann wieder mit Hilfe der Bernoulli'schen Gleichung beantwortet werden.

Angewendet auf die beiden Höhen  $h=0$  und  $h_1$  ergibt sich

$$p_L + 1/2 \cdot \rho v^2 = p_L + \rho g h_1,$$

denn bei  $h_1$  ist die Geschwindigkeit praktisch Null. Damit ist die Ausströmgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2gh_1} \quad (\text{Torricellisches Ausströmgesetz}).$$

Für die Volumenstromstärke ergibt sich damit  $I = A \cdot v = A \cdot (2g \cdot h_1)^{1/2}$ , wobei  $A$  die Querschnittsfläche des Schlauches ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Volumenstromstärke durch eine Vergrößerung der Querschnittsfläche  $A$  stärker zunimmt als durch eine Verlängerung der Höhe, denn die Volumenstromstärke ist zur Querschnittsfläche direkt proportional, zur Höhe hingegen nur proportional zur Quadratwurzel [Kamke (1982)].



## B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung

### Einleitung

Man zeigt den Schüler, wenn es möglich ist, einen kurzen Film, wobei ein Infusionseinsatz zu sehen ist. Dabei sollen die Schüler auf die Höhe des Behälters und das Vorhandensein der Tropfkammer achten. Einige Worte über die Geschichte der Infusionen können zur Steigerung des Interesses hilfreich sein.

### Beschreibung einer Infusion

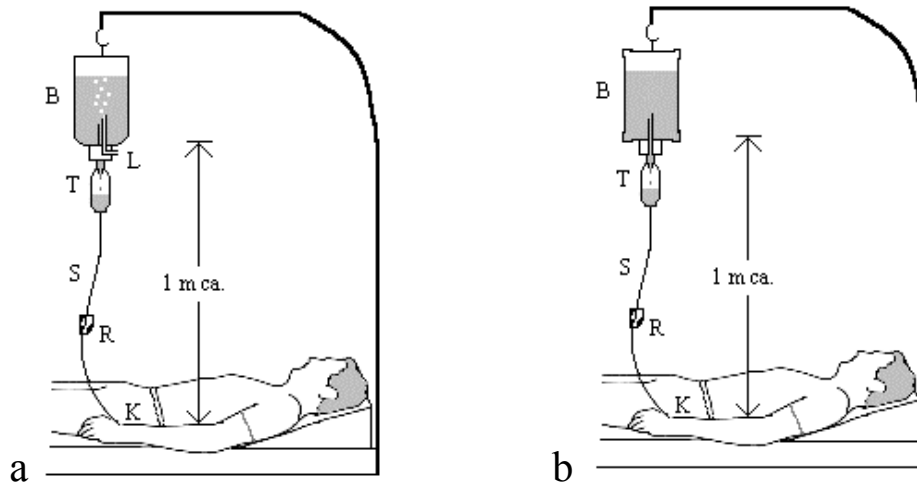
Das Arbeitsblatt Infusionen und Transfusionen soll den Schülern zeigen, wie eine Infusion bzw. Transfusion durchgeführt wird. Im Gespräch soll geklärt werden, warum sie so wichtig sind.

Durch das Bild lernen die Schüler die Anordnung einer Standard-Infusion kennen. Sicher bleiben einige Fragen offen, die aber schon teilweise vom Lehrer beantwortet werden können, indem er die Abbildungen kommentiert.

### Arbeitsblatt: Infusionen und Transfusionen

Die Bilder a) und b) zeigen die Standardanordnung einer Infusion. Der Unterschied zwischen den beiden Bildern besteht darin, dass in a) eine Glasflasche, in b) ein Plastikbeutel als Behälter verwendet wird.

Vom Behälter B tropft die Flüssigkeit durch die Tropfkammer T. Zwanzig Tropfen ergeben ungefähr 1 g Infusionsflüssigkeit.



Der Flascheninhalt fließt vom Behälter (B) durch eine Tropfkammer (T), einen Kunststoffschlauch (S) und eine Kanüle (K) in eine Vene. R ist eine Rollenklammer zur Regulierung der Tropfenfolge, L die Belüftung.

Versuche die folgenden Fragen zu beantworten.

- 1) Wie ändert sich die Infusionsgeschwindigkeit mit der Höhe bzw. dem Schlauch- und Kanülendurchmesser?
- 2) Warum hängt der Behälter ca. 1 m über dem Patienten?
- 3) Warum ist die Belüftung bei einer Glasflasche (Bild a) notwendig?
- 4) Warum ist die Belüftung bei einer Plastikflasche (Bild b) nicht notwendig?
- 5) Warum tritt kein Wasser bei der Belüftung heraus?
- 6) Wie groß ist der Schweredruck einer Wassersäule von 1 m Höhe?

### Blutdruck in den Gefäßen

Die Schüler wissen, dass bei einer Verletzung meistens Blut austritt. Viele von ihnen wissen aber nicht, dass Blut aus einer Arterie schneller als aus einer Vene austritt, denn Blut fließt auf Grund eines Druckunterschiedes zwischen linker und rechter Herzkammer erst durch die Arterien und dann durch die Venen. Daher ist der Druck in den Arterien größer als in den Venen. Bild 1 auf dem folgenden Arbeitsblatt zeigt wie hoch das Blut in senkrechten Röhren steigen würde, wenn diese Röhren direkt in die Arterien und Venen eingeführt würden. Diese Methode zur Messung des Blutdrucks - der „blutige“ Blutdruckmesser, der bei Menschen nicht verwendet wird, weil bessere und nicht invasive Methoden zur Verfügung stehen - war erstmals im Jahre 1733 an einem Pferd ausprobiert worden. Die Höhen der mit den Arterien verbundenen Kanülen, können wegen des Strömungswiderstands den Blutdruckschwankungen nicht folgen. Deswegen bleiben sie, allerdings mit kleinen Schwankungen, auf einem mittleren Niveau.

Mit Bild 1 gewinnen die Schülerinnen und Schüler einen Eindruck, welche Blutdruckwerte im Körper herrschen. Sie erkennen auch sofort, dass der Infusionsbehälter höher als die erzeugte Blutsäule gehängt werden muss, da sonst keine Flüssigkeit zum Körper, sondern Blut vom Körper zum Behälter fließt.

Die Rechnung, welchen Druck eine bestimmte Blutsäule bewirkt, sollte noch nicht in dieser Phase durchgeführt werden. Es genügt zunächst eine qualitative Schätzung.

Bild 2 (Lamm-Mensch-Transfusion) sieht etwas seltsam aus. Es soll dazu dienen, das Thema noch einmal aufzugreifen und bildhaft darzustellen, dass ein Druckabfall notwendig ist, um eine Blutübertragung durchführen zu können.

### Arbeitsblatt: Blutdruck in den Gefäßen

In Bild 1 kannst Du sehen, welche Höhe das Blut erreichen würde, wenn senkrechte Kanülen direkt in die Venen und Arterien eingeführt wären. Die Höhen der mit den Arterien verbundenen Kanülen zeigen einen mittleren Wert an, da ja der Blutdruck durch die Herzschläge periodisch schwankt.

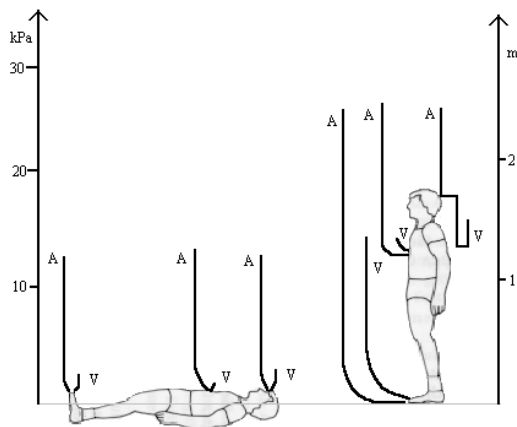


Bild 1: Mittlere, durch den Blutdruck in den Arterien (A) und Venen (V) erzeugte Blutsäule bei einem liegenden und einem aufrecht stehenden Menschen. In den Kopfvenen ist der Druck eines stehenden Menschen negativ.

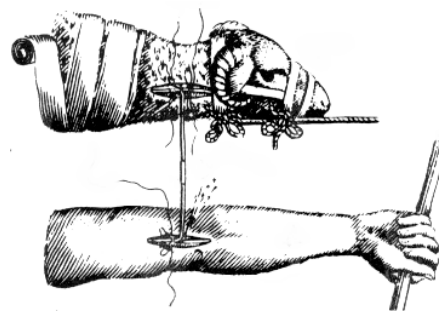


Bild 2: Lamm-Mensch-Bluttransfusion (nach Manfredi, Rom 1668).

- 7) Was passiert, wenn bei einer Infusion die Höhe, in der der Behälter aufgehängt wird und die Höhe der erzeugten Blutsäule übereinstimmen?
- 8) Ist es einfacher eine venöse oder eine arterielle Infusion durchzuführen?
- 9) Ist es möglich zwischen zwei Menschen eine direkte Blutübertragung von einer Arterie zu einer Vene durchzuführen? Und von einer Vene zu einer Arterie?

### *Durchführung einer Infusion*

Mit diesem Versuch können die Schüler erkennen, dass bei einer Infusion

- a) ein Druckunterschied herrschen muss, damit die Flüssigkeit fließt, und dass die Volumenstromstärke proportional zum Druckabfall ist;
- b) der Verlauf des Schlauches keine Rolle spielt, nur die Höhen von Anfang und Ende des Schlauches;
- c) der Kanüldurchmesser eine wichtige Rolle spielt;

Der Versuch ist motivierend, weil ein echtes Infusionsgerät benutzt wird.

Man verteilt folgendes Arbeitsblatt und ein komplettes Infusionsgerät mit Kanülen verschiedenen Durchmessers und unterschiedlicher Länge an jeweils drei Schüler, die den Versuch dann eigenständig durchführen können.

Hervorgehoben werden soll, dass der Fließwiderstand bei einem Infusionsgerät nicht nur durch die Kanüle verursacht wird, sondern auch durch den Schlauch und durch die Tropfkammer (wenn ein Filter eingebaut ist).

### **Arbeitsblatt: Tropffrequenz in Abhängigkeit vom Druckgefälle**

Baut den Versuch wie auf dem Bild auf.

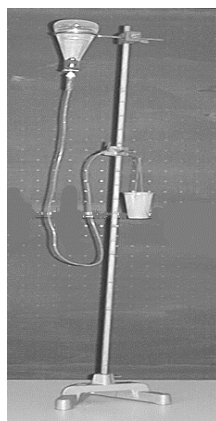
Hängt den Behälter in verschiedenen Höhen auf und zählt wie viele Tropfen in einer bestimmten Zeit fallen. Um die Höhendifferenz zwischen Infusionsbehälter und Auffangbecher messen zu können, müsst ihr erst den Nullpunkt der Skala festlegen. Ihr findet ihn, indem ihr den Auffangbecher erst unterhalb des Infusionsbehälters befestigt, dann tropft Wasser in den Becher. Schiebt nun langsam den Becher immer weiter nach oben, bis kein Tropfen mehr fällt. Jetzt habt ihr den Nullpunkt erreicht.

Tragt die zu den unterschiedlichen Höhendifferenzen zugehörigen Massenmenge in eine Tabelle ein.

Wiederholt den Versuch für verschiedene Kanüldurchmesser bzw. Kanülenlängen und legt für jeden Durchmesser eine Tabelle an.

Zeichnet ein Diagramm (waagrechte Achse: Höhendifferenz; senkrechte Achse: Tropffrequenz). Übertragt nun die Werte aus euren Tabellen in das Diagramm.

Ändert den Verlauf des Schlauches (bei einer festen Behälterhöhe und dem selben Kanüldurchmesser) und wiederholt einige Messungen, um festzustellen, ob die Massenmenge sich ändert.



Infusionsgerät zur  
Messung der  
Tropffrequenz.

#### **Fragen:**

- 10) Wie ändert sich die Massenmenge mit dem Druckabfall (Höhe des Behälters)?
- 11) Wie ändert sich die Massenmenge mit dem Kanüldurchmesser?

### Volumenstromstärke

Der Lehrversuch, der im Bild 4.5.3.5 dargestellt ist, ist anschaulich. Er kann vom Lehrer zur Wiederholung gemacht werden, um die Verbindung zwischen Druck, Volumenstromstärke und Widerstand besser zu verstehen.

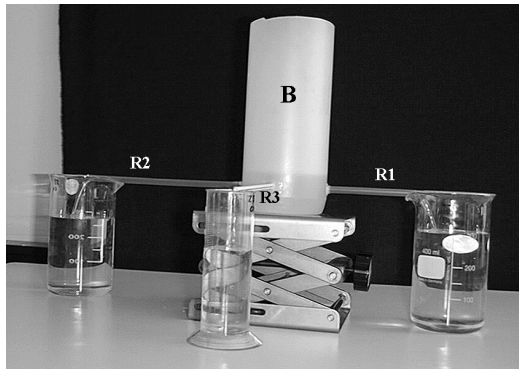


Bild 4.5.3.5: Das Wasser fließt vom Behälter B durch drei Rohre R1, R2, R3, wobei R2 den gleichen Durchmesser aber die doppelte Länge von R1 hat. R3 hat die gleiche Länge aber den doppelten Durchmesser von R2.

Man füllt den Behälter B bis zu einer bestimmten Wasserhöhe und lässt Wasser in die Messbecher (einer für jede Kanüle) ausfließen. Durch Rohre verschiedener Dicke und verschiedener Länge können die Schüler erkennen, wie die Volumenstromstärke von dem Druck bzw. dem Durchmesser und der Länge der benutzten Rohre abhängt.

Bei kurzen Rohren oder großen Durchmessern ist die Volumenstromstärke proportional zu  $r^2$  und die Länge spielt eine geringe Rolle (kurze Rohre an einem Behälter angesteckt, sind vergleichbar mit einfachen Löchern im Behälter und daher ist die Volumenstromstärke zu  $r^2$  proportional). Lange Rohre und Rohre kleinen Durchmessers folgen hingegen der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung.

Es ist anzunehmen, dass jeder Schüler intuitiv denkt, dass eine Flüssigkeit mit einer hohen Viskosität langsam fließt. Je viskoser die Flüssigkeit aber ist, desto kleiner wird die Volumenstromstärke. Hat das Blut z. B. eine 3-4mal so große Viskosität wie Wasser, dann sollte die Volumenstromstärke 3-4mal kleiner sein.

Man kann in jedem Fall einige Messungen mit Flüssigkeiten verschiedener Viskosität durchführen. Das Ergebnis zeigt, dass die Volumenstromstärke von der Viskosität abhängt.

Man kann z. B. gezuckertes Wasser benutzen, das eine höhere Viskosität hat oder gebrauchtes Öl, das eine vielfach größere Viskosität als Wasser hat.

-	Wasser	(20°)	1
-	Äther	(20°)	0,2
-	Benzol	(20°)	0,6
-	Blut	(37°)	4
-	Motoröl	(20°)	200
-	Glyzerin	(20°)	1000
-	Luft	(20°)	18
-	Wasserstoff	(20°)	10
-	Kohlendioxid	(20°)	16

Ungefähre Viskositätswerte einiger  
Flüssigkeiten und Gase (mPa · s)

### Weitere Fragen

- 12) Kann eine Infusion funktionieren, wenn der Behälter nur 10 cm über dem Patienten hängt?
- 13) Während einer Infusion wird die Belüftung geschlossen. Ist das Fließen behindert?
- 14) Bei einer Infusion wird als Behälter ein Plastikbeutel mit Belüftungsrohr verwendet. Verändert sich die Volumenstromstärke im Vergleich zur Verwendung eines Infusionsgerätes ohne Belüftung?
- 15) In den oberen Teil einer Infusionsflasche wird ein Loch gemacht. Tritt durch das Belüftungsrohr Wasser aus?
- 16) Wie hoch soll der Behälter bei einer arteriellen Infusion gehängt werden?
- 17) Bei einer Bluttransfusion ist der Blutspender 50 cm über dem Empfänger. Ist es so möglich eine direkte Übertragung von einer Arterie zu einer Vene durchzuführen? Und von einer Vene zu einer Arterie?
- 18) An einen Behälter sind 2 Schläuche angebracht. Fließt in der selben Zeit eine größere Wassermenge durch einen 5 m langen Schlauch mit 1 cm Durchmesser oder durch einen 10 m langen Schlauch mit 2 cm Durchmesser?
- 19) Fließt Wasser oder Blut schneller, wenn man das gleiche Infusionsgerät verwendet?

### Antworten

- 1) Die Infusionsgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe bzw. dem Schlauch- und Kanülen-durchmesser zu.
- 2) Der erzeugte Druck der Flüssigkeitssäule muss so hoch sein, dass der Blutdruck des Patienten und der Strömungswiderstand aufgehoben werden, um eine genügend hohe Infusionsgeschwindigkeit zu erreichen.
- 3) Der Druck der abgeschlossenen Luftmenge muss sich dem äußeren Luftdruck angleichen können, sonst vergrößert sich der Unterdruck im Behälter, bis der Flüssigkeitsfluss gestoppt wird.
- 4) Der Plastikbeutel zieht sich zusammen, während er sich entleert, der Druck im Inneren bleibt gleich (ca. 1 bar).
- 5) Im Behälter herrscht ein Unterdruck.
- 6) Der Schweredruck einer Wassersäule ist der Quotient aus Gewichtskraft und Basisfläche:  
$$p = m \cdot g/A = \rho \cdot V \cdot g/A = \rho \cdot h \cdot A \cdot g/A = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,8 \text{ m s}^{-2} \cdot 1 \text{ m} \cong \cong 10^4 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2} = 10 \text{ kPa}.$$
- 7) Bei den venösen Infusionen würde sich keine Flüssigkeit bewegen. Bei den arteriellen Infusionen wird in der Anspannungsphase des Herzens ein wenig Blut vom Patienten zum Behälter fließen. In der Erschlaffungsphase des Herzens wird das im Schlauch vorhandene Blut zum Patienten zurückfließen.
- 8) Es ist einfacher eine venöse Infusion durchzuführen, denn der Druck in einer Vene schwankt nicht und ist außerdem eher schwach ( $< 2 \text{ kPa}$ ). Hingegen schwankt der Druck in einer Arterie von 11 bis 16 kPa.
- 9) Eine direkte Übertragung zwischen zwei Menschen von Arterie zur Vene ist möglich, denn in den Arterien herrscht ein größerer Druck als in den Venen. Von einer Vene zu einer Arterie ist die Übertragung nur möglich, wenn der Blutempfänger mehr als 2 m unter dem Spender liegt.
- 10) Die Tropffrequenz ist nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille direkt proportional zur Höhe des Behälters. Eine doppelte Höhe entspricht ca. einer doppelten Tropffrequenz.
- 11) Die Tropffrequenz hängt stark vom Durchmesser ab. Wird der Durchmesser verdoppelt, so wird die Tropffrequenz 16 mal so hoch.
- 12) Die Flüssigkeitssäule eines 10 cm höher gehängten Behälters erzeugt einen Druck von ca. 1 kPa, der kleiner als der normale Venendruck ist. Die Flüssigkeit fließt daher nicht vom Behälter zum Körper.

- 13) Wenn die Belüftung geschlossen wird, fließt die Flüssigkeit nur solange, bis der Unterdruck, der im Behälter durch das Fließen wächst, dem Schweredruck an dem Kanülenende entspricht.
- 14) Die Volumenstromstärke bleibt gleich, weil der Druck im Behälter in beiden Fällen gleich ist (atmosphärischer Druck).
- 15) Im Behälter herrscht auf der Flüssigkeitsoberfläche wegen des Loches der atmosphärische Druck. Auf der Belüftungshöhe herrscht daher ein Überdruck und Flüssigkeit fließt durch die Belüftung aus.
- 16) In den Arterien schwankt der Blutdruck von 11 bis 16 kPa. Die Flüssigkeitssäule der Infusion muss einen Druck erzeugen, der mindestens diese Werte überschreitet und zwar mindestens 1,6 m Höhe.
- 17) In dieser Lage ist es möglich eine direkte Infusion Arterie-Vene durchzuführen, da der Druck in den Arterien größer ist als in den Venen, außerdem kommt noch der Schweredruck der Blutsäule zwischen Spender und Empfänger hinzu. Eine direkte Infusion Vene-Arterie ist nicht möglich, weil der Druck in der Kanüle nur ca. 7 kPa (5 kPa von der Blutsäule und 2 kPa Venenblutdruck) betragen würde und 16 kPa überschreiten müsste.
- 18) Die Volumenstromstärke hängt nach unseren Versuchsergebnissen stärker von dem Durchmesser ab als von der Länge. Daher fließt mehr Wasser bei einem Schlauch doppelten Durchmessers, auch wenn er doppelt so lang ist.
- 19) Wasser fließt schneller als Blut, weil es eine niedrigere Viskosität hat.

#### 4.5.4 Die Skiaskopie<sup>1</sup>

Die *Skiaskopie* oder Schattenprobe (griech. skiá = Schatten, skopé = Beobachtung) ist das älteste und bekannteste Verfahren zur *objektiven Refraktionsbestimmung*. Sie wurde bereits 1873 von einem französischen Militärarzt eingeführt, auch wenn eine physikalische und geometrisch exakte Begründung mit quantitativen Beziehungen erst viel später niedergelegt wurde [Rössler (1985)].

Die Skiaskopie lässt sich mit Grundkenntnissen der geometrischen Optik erklären. Sie ist aber, gemessen an anderen in der Schule üblicherweise behandelten Inhalten, relativ kompliziert, weil viele Variablen, die zum Teil voneinander abhängig sind (Beleuchtungs- und Beobachtungsabstand, Linsenstärke, Untersuchungsanordnung) entscheidenden Einfluss auf die zu beobachtenden Phänomene haben. Da die geometrische Optik oft in der 9. Klassenstufe behandelt wird, soll hier nur eine sehr vereinfachte Erklärung gegeben werden.

Ein nach unserer Ansicht wichtiges Lernziel aus der Optik wird bei dem hier geschilderten Verfahren besonders deutlich: die Wichtigkeit des Beobachtersauges bei allen optischen Überlegungen.

### A. Basiswissen über Beleuchtung der Netzhaut und Erscheinungen auf der Pupille

#### Die Skiaskopie

Bei der Skiaskopie wird durch einen Augenspiegel oder ein Skiaskop (Gerät, das einen Augenspiegel und eine Lampe beinhaltet) Licht in das untersuchte Auge geworfen. Dieses Licht wird an der Netzhaut gestreut und wirkt als sekundäre Lichtquelle. Man sieht in der Patientepupille beim Schwenken des Augenspiegels bestimmte Licht- und Schattenphänomene. Entweder leuchtet die ganze Pupille rot auf oder ein Lichtfleck läuft beim Schwenken durch die Pupille. Dies kann gleich- oder gegensinnig zur Spiegelbewegung erfolgen. Aus der Beurteilung dieser Leuchterscheinungen kann man sagen, ob Kurz-, Weit- oder Normalsichtigkeit vorliegt [Vehlhagen (1972)].

Es gibt heute viele automatische Geräte zur objektiven Refraktionsbestimmung, die Skiaskopie bleibt aber ein nützliches Verfahren, sowohl wegen der Genauigkeit der Ergebnisse, z.B. bei Trübungen im Auge, als auch wegen der Einfachheit der benötigten Geräte. Tatsächlich wurde in den Anfangszeiten der Skiaskopie für deren Durchführung nur ein Augenspiegel und Linsen verschiedener Brechkraft verwendet. Allerdings waren eine manuelle Begabung und eine lange Erfahrung nötig. Die modernen Skiaskope (Zusammensetzung von einer Lampe und Projektionsoptik) sind einfach zu bedienen, sie bieten außerdem viele Vorteile, wie die Verminderung von störendem Streulicht und Reflexen mittels gefärbten Lichtes oder mittels Polarisationsfilter, oder den Vorteil, die Divergenz des Beleuchtungsstrahlenganges ändern zu können. Das erleichtert das Verfahren und verkürzt die Untersuchungszeit, so dass die Skiaskopie (insbesondere in armen Ländern) an jedem Ort zur Bestimmung von Refraktionsanomalien eingesetzt werden könnte, auch ohne Verwendung von Tropfen (Atropin), um die Pupillen zu erweitern. Allerdings ist ein Mittel zur Akkommodationshemmung (Aufhebung der Naheinstellungsreaktion) zwar nicht erforderlich, aber hilfreich.

---

<sup>1</sup> Teile der Einheit wurde bereits veröffentlicht: [Colicchia u. a. (2001a)].

**Beleuchtung der Netzhaut.** Die Beleuchtung der Netzhaut dient nur dazu, um das Licht ins Auge zu bringen. In der augenärztlichen Literatur werden verschiedene Skiaskopieverfahren beschrieben, die sich teilweise nur in Details unterscheiden. Das heute verbreitetste dieser Verfahren ist die *Strichskiaskopie*. Dabei wird im Beleuchtungsstrahlengang nach Bild 4.5.4.1 ein Lichtbalken auf die Netzhaut des Patientenauges eingespiegelt. Die Glühwendel der Lampe ist dazu als „Strich“ ausgebildet. Sie wird durch die Linse des Patientenauges mehr oder weniger scharf auf die Netzhaut abgebildet. Durch die Orientierung des Lichtbalkens ist eine Richtung bevorzugt, so dass verschiedene Meridiane einfacher überprüft werden können. Dies erleichtert die Untersuchung bei Astigmatismus.

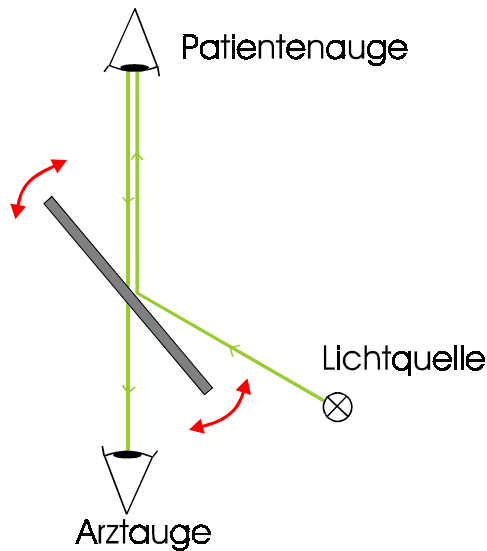


Bild 4.5.4.1: Beleuchtungs- und Beobachtungsbündel bei Untersuchung des Auges

Der beleuchtete Netzhautbereich streut diffus und wirkt nun als *sekundäre Lichtquelle*. Das von ihm durch die Pupille zurückgeworfene Licht dient zur Durchführung der Skiaskopie.

Für das Prinzip der Skiaskopie ist diese Stufe von geringer Bedeutung. Es ist vorteilhaft, für die weiteren Überlegungen ganz vom Beleuchtungsstrahlengang abzusehen und diesen einfach durch eine gedachte Lichtquelle auf der Netzhaut zu ersetzen.

Dies soll in den folgenden Abschnitten angenommen werden.

**Statische Beurteilung der optischen Erscheinungen in der Pupille.** Hier liegt der in optischer und diagnostischer Hinsicht eigentlich interessante Punkt der Skiaskopie. Indem der Arzt auf die Pupille des Patienten schaut und überprüft, ob die Pupille als Ganzes rot aufleuchtet oder nicht, kann er schon beurteilen, ob Normal- oder Fehlsichtigkeit vorliegt.

#### a) normalsichtiges Auge.

Wir betrachten zunächst eine statische Situation, in der die sekundäre Lichtquelle (der beleuchtete Fleck auf der Netzhaut) nicht bewegt wird. Es liegt die in Bild 4.5.4.2 gezeigte einfache Anordnung vor: Das von der sekundären Lichtquelle auf der Patientennetzhaut ausgehende Lichtbündel wird von der Linse des Patientenauges gebrochen. Das Beobachterauge (Arztauge) betrachtet das von der Patientenpupille ausgehende Licht. Das Patientenauge soll entspannt sein bzw. in die Ferne akkommodiert, das Beobachterauge soll sich in einiger Entfernung vom Patientenauge befinden und auf die Patientenpupille fokussiert sein.

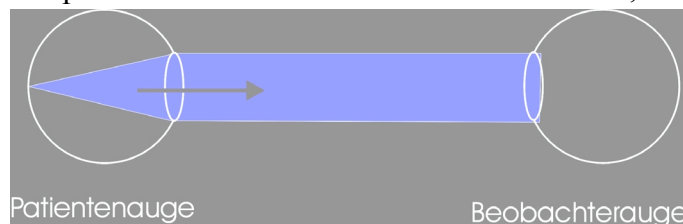


Bild 4.5.4. 2: Das vom normalsichtigen Patientenaugen ausgehende Lichtbündel fällt ins Beobachterauge (das auf die Patientenpupille fokussiert sein soll).

Die interessante Frage ist nun: Was sieht das Arztauge? Da die Lichtquelle (Patientennetzhaut) sich in der Brennebene der Linse befindet (normalsichtiges Auge), verlässt das von einem Punkt auf der beleuchteten Netzhaut



ausgehende Licht die Linse als paralleles Bündel. Das Augenarztauge sieht Licht von jedem Punkt der Patientenpupille ausgehen: sie erscheint hell. Was kann der Arzt aus seiner Beobachtung schließen? Er muss den umgekehrten Weg gehen. Aus der als Ganzem aufleuchtenden Patientenpupille schließt er auf ein paralleles Lichtbündel zurück. Das bedeutet aber, dass sich die Netzhaut in der Brennebene der Linse befindet, dass das Auge also normalsichtig ist.

#### b) fehlsichtiges Auge

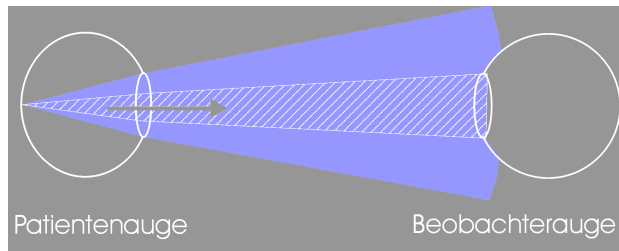


Bild 4.5.4.3: Beim weitsichtigen Auge ergibt sich ein divergentes Lichtbündel. Nur der schraffiert gezeichnete Teil des Lichts fällt ins Beobachterauge.

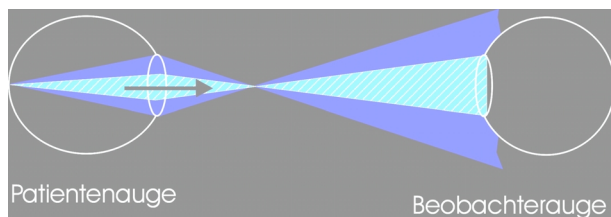


Bild 4.5.4.4: Verlauf des Lichtbündels beim kurzsichtigen Auge. Auch hier fällt nur der schraffiert gezeichnete Teil des Lichts ins Beobachterauge.

Bei einem weitsichtigen Auge liegt die Netzhaut vor der Brennebene der Linse. Das sich ergebende Lichtbündel ist in Bild 4.5.4.3 gezeigt. Nach Verlassen der Patientenlinse ist es divergent. Nicht alles davon fällt ins Arztauge. Nur das Licht aus dem schraffierten Bereich gelangt ins Arztauge. Das bedeutet, dass der Arzt nicht alle Teile der Pupille aufleuchten sieht. Nur der zentrale (schraffierte) Bereich der Pupille ist hell. Daran kann der Arzt gerade erkennen, dass es sich um ein fehlsichtiges Auge handelt.

Ganz Analoges geschieht beim kurzsichtigen Auge. Das Lichtbündel konvergiert nun an einem bestimmten Punkt vor dem Arztauge und divergiert anschließend wieder (Bild 4.5.4.4). Auch hier fällt nur das Licht aus dem schraffierten Bereich ins Arztauge. Der Arzt sieht wieder nur den zentralen Teil der Pupille aufleuchten.

Mit diesem einfachen Verfahren kann der Arzt bereits beurteilen, ob der Patient normal- oder fehlsichtig ist. Indem man Brillengläser verschiedener Stärke vor das Patientenauge setzt, kann man versuchen, das für den Patienten „passende“ Glas zu finden. Wenn der Patient das passende Glas vor dem Auge hat, leuchtet die ganze Pupille wie beim normalsichtigen Auge auf. Patientenauge und Brillenglas zusammen sind dann normalsichtig, weil die Fehlsichtigkeit durch die vorgeschalteten Gläser ausgeglichen ist.

#### Schwenken des Augenspiegels

Die statische Beurteilung der optischen Erscheinungen hat allerdings einen Nachteil: Man weiß nicht, ob der Patient kurz- oder weitsichtig ist und kann nur raten, welches Brillenglas man ihm vor das Auge setzen soll. In dieser Form wird das Verfahren in der Praxis deshalb nicht angewendet. Der Arzt hätte gerne einen Anhaltspunkt, ob es sich bei der Fehlsichtigkeit des Patienten um Kurz- oder Weitsichtigkeit handelt und wie stark diese ist. Dazu wird der Spiegel geschwenkt. Der Arzt beobachtet, auf welche Weise die Lichterscheinungen dabei durch die Pupille wandern. Dieses Verfahren meint man genau genommen, wenn man von Skiaskopie spricht.

Nehmen wir an, dass die beleuchtende Lichtquelle im Uhrzeigersinn gedreht wird. Dann wandert auch der auf der Netzhaut beleuchtete Fleck im Uhrzeigersinn (in Bild 4.5.4.5a-b und in Bild 4.5.4.6a-b von unten nach oben). Sowohl bei Weitsichtigkeit (Bild 4.5.4.5a-b) als auch bei Kurzsichtigkeit (Bild 4.5.4.6a-b) dreht sich das Patientenauge verlassende Lichtbündel auch im Uhrzeigersinn und das Licht erreicht das Beobachterauge in beiden Fällen von derselben Seite. Einen Unterschied gibt es aber: Bei Weitsichtigkeit rührt das Licht von dem unteren Teil der Patientenpupille her, während das Licht bei Kurzsichtigkeit von dem oberen Teil der Patientenpupille herkommt. Die Lichtbewegung erscheint daher dem Beobachterauge in Richtung unten-oben bei Weitsichtigkeit und in Gegenrichtung bei Kurzsichtigkeit. Bei Normalsichtigkeit ist bei größerem Abstand ein kurzes Aufleuchten (Flackern) der gesamten Pupille zu beobachten.

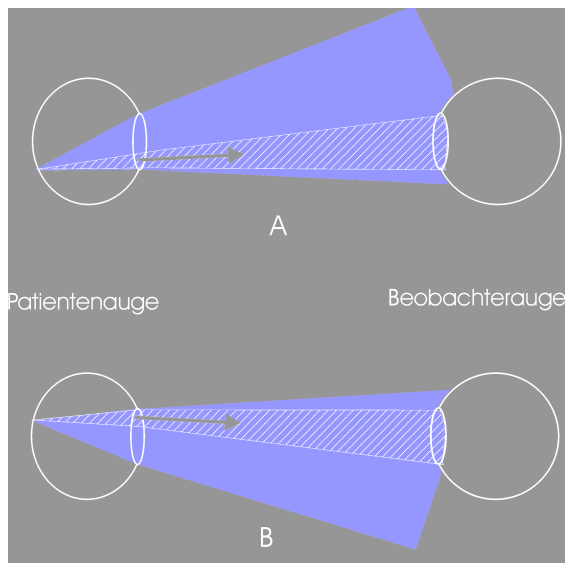


Bild 4.5.4.5a-b: Bei Bewegung im Uhrzeigersinn wandert bei einem weitsichtigen Auge die Leuchterscheinung in der Patientenpupille vom unteren (A) zum oberen Teil (B)

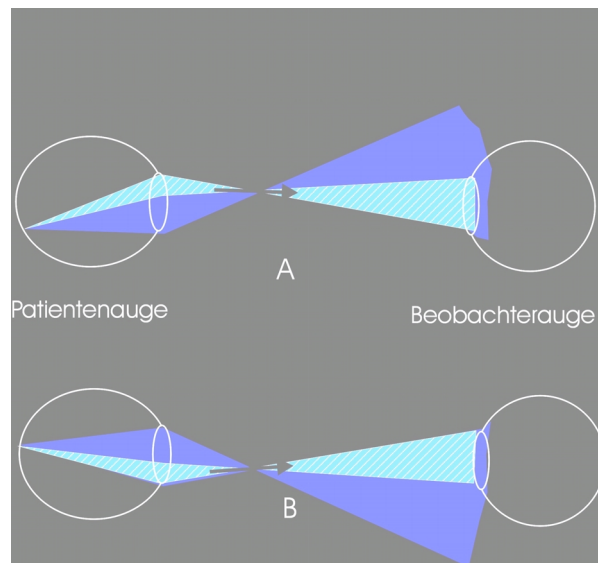


Bild 4.5.4.6a-b: Bei Bewegung im Uhrzeigersinn wandert bei einem kurzsichtigen Auge die Leuchterscheinung in der Patientenpupille vom oberen zum unteren Teil

## B. Hinweise zur Unterrichtsdurchführung

### *Einleitung*

Man erklärt zunächst den Unterschied zwischen subjektiver und objektiver Refraktionsbestimmung. Man teilt den Schülern mit, dass heute die objektive Refraktionsbestimmung hauptsächlich durch automatische Geräte durchgeführt wird, zur Freude der Augenärzte, weil sie nun die so unbeliebte Skiaskopie vernachlässigen können. Sie zu beherrschen stellt eine große Anforderung an Handfertigkeit bzw. erfordert eine lange Erfahrung.

Man zeigt dann das der Skiaskopie zu Grunde liegende Konzept und zwar, dass Strahlen aus einer im Brennpunkt liegenden Lichtquelle parallel die Linse verlassen (Folien von Bild 4.5.4.2). Ein solches Lichtbündel trifft bei Rotation ein entferntes Auge kurz und als Ganzes nur, wenn sich das Auge genau im Strahlengang befindet. Durch Folien von Bild 4.5.4.3 und Bild 4.5.3.4 zeigt man den Schüler die statischen Erscheinungen bei Weit- und Kurzsichtigkeit.

### *Beleuchtung der Netzhaut*

Mit der Folie (Bild 4.5.4.7) zeigt man zunächst, dass sich das beleuchtende Lichtbündel und der beleuchtete Fleck auf der Netzhaut stets im gleichen Uhrzeigersinn bewegen, unabhängig davon, ob das Patientenauge normal-, kurz- oder weitsichtig ist. Dass eine Drehung der Lichtbündel eine Drehung des beleuchteten Flecks auf der Netzhaut mit demselben Drehsinn bewirken kann, ist für die Schüler plausibel und kann sehr einfach mit der Tafeloptik demonstriert werden.

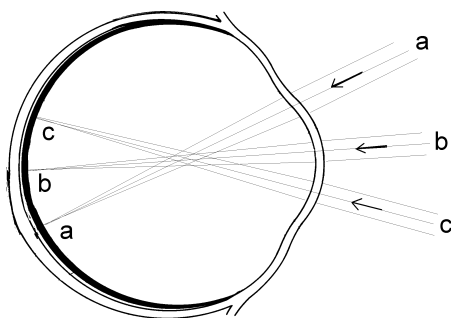


Bild 4.5.4.7: Gleichsinnige Wanderung der Beleuchtung und des beleuchteten Netzhautflecks. Dabei wird nur die Hornhaut als brechende Fläche berücksichtigt

### *Lichtbündel vom Patientenauge bei Bewegung der Lichtquelle*

Die größte Schwierigkeit für die Schüler, dieses Thema zu verstehen, liegt darin, ob sie sich vorstellen können, wie sich bei Bewegung der Lichtquelle die Lichtbündel drehen bzw. wie die Lichtbündel auf das Beobachterauge auftreffen. Es ist daher sinnvoll, durch einen Lehrerversuch die Ausbreitungsrichtung der Lichtbündel zu zeigen, die aus einem untersuchten Auge kommen.

Man simuliert ein Auge durch ein einfaches Modell. Es besteht nur aus einer Linse (z. B.  $f = 100 \text{ mm}$ ) und einer möglichst punktförmigen aber starken Lichtquelle (z. B. Glühlampe,  $P > 20 \text{ W}$ ), die den beleuchteten Fleck auf der Netzhaut darstellt. Eine Hälfte der Linse wird mit roter, die andere mit grüner Scheinwerferfolie bedeckt, oder die zwei Hälften der Linse sollen mit verschiedenen Farben, z. B. Rot und Grün, angestrichen werden (Bild 4.5.4.8).

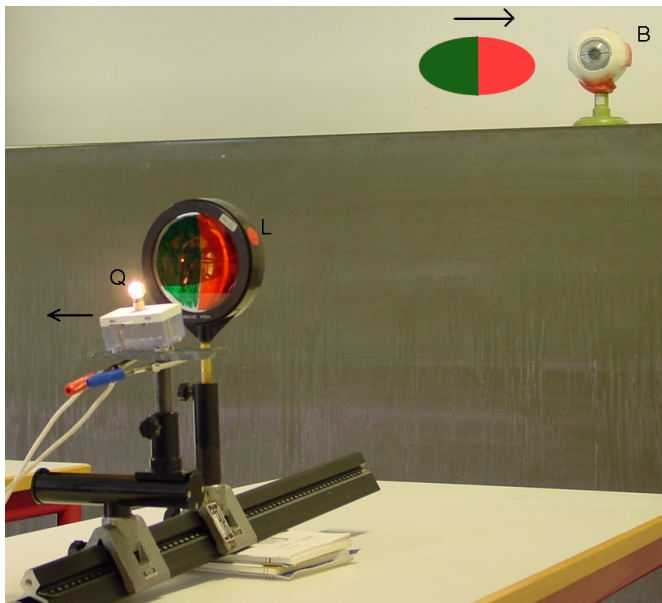


Bild 4.5.4.8: Auftreffen des aus einem Augenmodell kommenden Lichtes auf ein Beobachterauge

Beim Verschieben der Lampe Q (als leuchtender Netzhautfleck) wandert der durch die Linse auf die Wand projizierte Fleck (der Abstand Linse – Wand muss größer als die Bildweite sein) und trifft in einer bestimmten Position auf das „Beobachterauge“ B. Wird die Lichtquelle bei einem weit-sichtigen Augenmodell (der Abstand Linse – Lampe ist kleiner als die Brennweite) „auf der Netzhaut“, d.h. parallel zur Linse, bewegt, beobachten die Schüler, dass bei einer Bewegung von rechts nach links in der Versuchsanordnung von Bild 4.3.4.8 zuerst rot und dann grün auf der Beobachterpupille B erscheint.

Wiederholt man den Versuch bei einem kurzsichtigen Auge (der Abstand

Linse – Lampe ist größer als die Brennweite), stellen die Schüler fest, dass bei der Bewegung „auf der Netzhaut“ nach links dieses Mal zuerst grün und dann rot auf der Beobachterpupille zu sehen ist.

Beim Modell eines normalsichtigen Auges befindet sich die Lichtquelle in der Brennebene der Linse. Bei der Bewegung „auf der Netzhaut“ wird das Beobachterauge kurz beleuchtet, ohne eine von den beiden Farben erkennen zu können.

Es soll hervorgehoben werden, dass das gesamte Lichtbündel, das die Modelllinse (Patienten-pupille) verlässt, sich in *entgegengesetzter* Richtung wie die Lichtquelle bewegt. Außerdem soll erwähnt werden, dass ein Auge nur einfallendes Licht sehen kann.

Das Verständnis der oben genannten Erscheinung wird durch folgende Folie erleichtert (Bild 4.5.4.9a-b). Wenn sich die Lichtquelle Q vor dem Brennpunkt B befindet (a), bleiben die durch die Linse gefärbten Lichtbündeln auf derselben Seite. Befindet sich hingegen die Licht-quelle hinter dem Brennpunkt (b), dann ist auf dem Schirm S eine Farbumkehr zu beo-bachten.

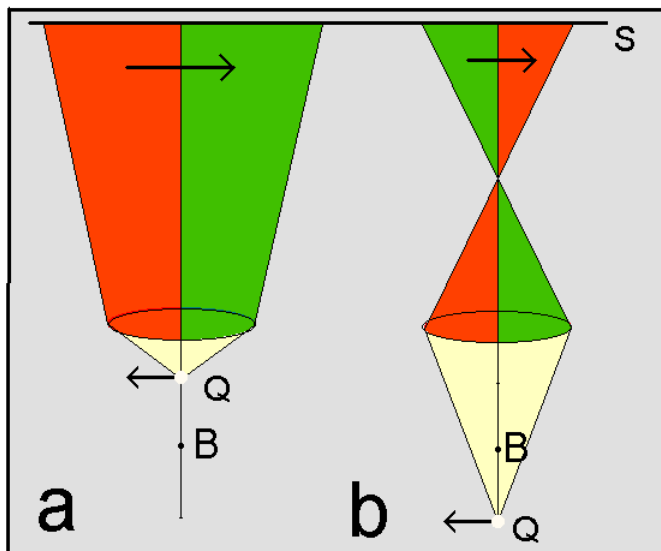


Bild 4.5.4.9a-b: Farbumkehr von Licht-quelle vor dem Brennpunkt (a) zur Licht-quelle hinter dem Brennpunkt (b). B ist der Linsenbrennpunkt, S Schirm, Q Licht-quelle. Die Pfeile geben die Bewegungs-richtung von Lichtquelle und Farbfleck an.

### *Beobachtung des von der Netzhaut kommenden Lichtes*

Man kann die Beobachtung des von der Netzhaut kommenden Lichtes einfach simulieren, indem das Modell des Patientenauges mit Hilfe eines Papprohres zur Fixierung der Beobachtungsrichtung beobachtet wird (Bild 4.5.4.10).

Als besonders geeignet hat sich eine rote Leuchtdiode erwiesen, mit der man einen der Realität entsprechenden Farbeindruck erzielen kann. Der Versuchsaufbau ist so einfach, dass man das Experiment leicht als Schülerexperiment durchführen kann.

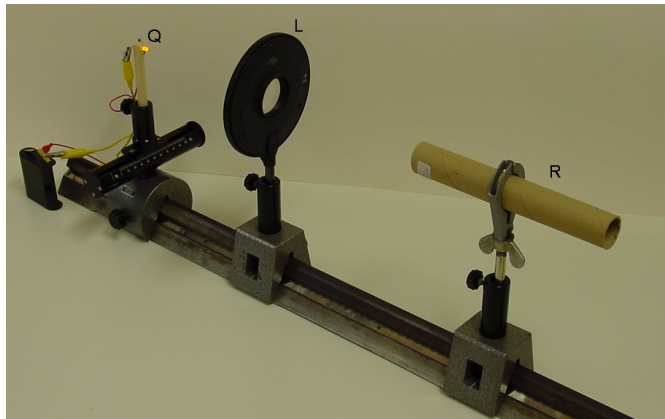


Bild 4.5.4.10: Anordnung zur Simulation optischer Erscheinungen eines Auges. Dabei entspricht Q (Lichtquelle) dem beleuchteten Netzhautfleck und L (Linse) der Augenlinse. Das Rohr R dient zur Fixierung der Beobachtungsrichtung

### *Normalsichtiges Auge*

Zur Simulation eines normalsichtigen Auges wird im Experiment die Lichtquelle in die Brennebene der Linse gebracht (s. Anordnung in Bild 4.5.4.10). Die Bewegung des beleuchteten Flecks auf der Netzhaut simuliert man durch eine langsame seitliche Hin- und Herbewegung der Lichtquelle.

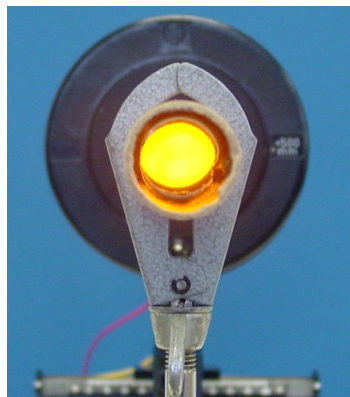


Bild 4.5.4.11: Flackern bei Normalsichtigkeit

Die Bewegung des beleuchteten Flecks auf der Netzhaut simuliert man durch eine langsame seitliche Hin- und Herbewegung der Lichtquelle.

Beim Verschieben nimmt man keine „Bewegung“ der Pupillenhelligkeit mehr wahr. Die Linse leuchtet kurz als Ganzes auf und wird dann wieder dunkel (Bild 4.5.4.11).

Der „Arzt“ oder die „Ärztin“, die die Lichterscheinungen beurteilt, soll in genügend großem Abstand vom „Patientenauge“ postiert werden. Nur dann überstreicht das vom Modellauge ausgehende Lichtbündel das Beobachteraue nur während eines kurzen Moments.

Kennzeichen der Normalsichtigkeit ist, dass das bei entspanntem Patientenauge von einem Punkt auf der Netzhaut kommende Licht die Pupille als paralleles Bündel verlässt.

### *Weitsichtiges Auge*

Zur Simulation eines weitsichtigen Auges wird die Lichtquelle von der Brennebene ein Stück in Richtung Linse gerückt. Eine Schülerin oder ein Schüler verschiebt die Lichtquelle langsam „auf der Netzhaut“ – d. h. zur Seite. „Arzt“ oder „Ärztin“ beobachten die „Pupille“ (die Linse) aus großer Entfernung und beurteilen die Pupillenhelligkeit, d. h. sie halten fest, welcher Teil der Pupille hell erscheint und in welche Richtung sich die Leuchterscheinung bewegt.



Was wird dabei festgestellt? Nehmen wir an, die Lichtquelle wandere auf der „Netzhaut“ nach rechts. Dann sieht der Beobachtende die Leuchterscheinung auf der Pupille ebenfalls nach rechts wandern (Bild 4.5.4.12).

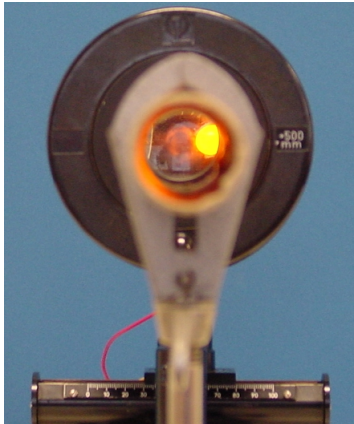


Bild 4.5.4.12: Gleichsinnige Bewegung von Lichtquelle und Leuchterscheinung nach rechts

Die Bewegungsrichtung von Netzhautreflex (und damit Spiegeldrehung) und Pupillenhelligkeit ist gleichgerichtet. Man nennt dies *Mitläufigkeit*.

Das Phänomen der Mitläufigkeit tritt nur deshalb auf, weil das Arztauge zu jedem Zeitpunkt einen anderen Teil aus dem Lichtbündel herausausschneidet. Die Mitläufigkeit ist keine Eigenschaft des austretenden Lichtbündels, sondern der Effekt des „Beschneidens“ des Lichtbündels durch das Arztauge.

### Kurzsichtiges Auge

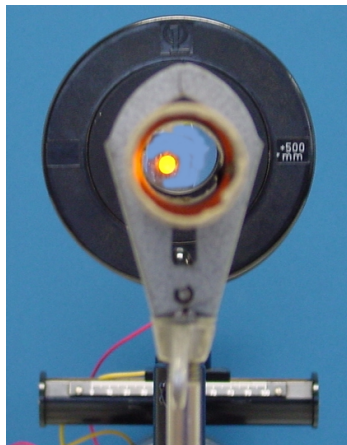


Bild 4.5.4.13: Gegensinnige Bewegung von Lichtquelle (nach rechts) und Leuchterscheinung (nach links)

Man führt den gleichen Versuch für ein kurzsichtiges Auge durch. Die Lichtquelle wird hinter der Brennebene „auf der Netzhaut“ wieder nach rechts verschoben. „Arzt“ oder „Ärztin“ sehen die Pupillenhelligkeit (den erleuchteten Teil der Linse) in die *andere* Richtung wandern (Bild 4.5.4.13). Dies nennt man *Gegenläufigkeit*. In der Skiaskopie ist die Gegenläufigkeit das Anzeichen der Kurzsichtigkeit.

Das Auftreten der Gegenläufigkeit kann man sich leicht durch Betrachtung des Lichtbündels nach einer Folie nach Bild 4.5.4.6 klar machen. Der Unterschied zum Fall der Weitsichtigkeit liegt darin, dass das Lichtbündel vor dem Arztauge konvergiert, d. h. die Lichtstrahlen überschneiden sich (vgl. Bild 4.3.4.4). In der Abbildung stellt der schraffierte Teil des Lichtbündels denjenigen Anteil des Lichts dar, der ins Arztauge gelangt. Der schraffierte Teil der Pupille wird vom Arztauge hell gesehen.

### Korrektur von Fehlsichtigkeiten

Ziel der Skiaskopie ist das Auffinden des „Flackerpunkts“ („Neutralpunkt“), das die Normal-sichtigkeit anzeigt. Dazu werden vor das fehlsichtige Auge Korrekturlinsen gesetzt, die so lange variiert werden, bis der Flackerpunkt gefunden ist (Bild 4.5.4.14). Auf diese Weise ermittelt man die zur Korrektur des Sehfehlers nötige „Stärke“ des Brillenglases.

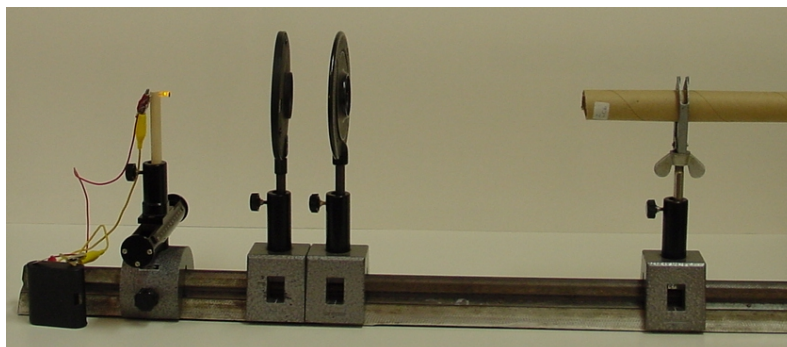


Bild 4.5.4.14: Zusätzliche Linse zur Ermittlung der Brechkraft der Korrekturlinse

Hinweis:

Es wurde schon erwähnt, dass zum Erkennen des Flackerns ein großer Abstand zwischen Arzt und Patient günstig ist. Der Bildpunkt in Bild 4.5.4.4 muss sich in ausreichender Entfernung vor dem Beobachteraue befinden, sonst ist die Gegenläufigkeit nicht beobachtbar.

In der Praxis wird durch eine einfache Maßnahme ein kleinerer Skiaskopierabstand erreicht. Vor das Patientenauge wird eine zusätzliche Linse z. B. von +2 Dioptrien gesetzt. Das bedeutet, dass das Lichtbündel beim normalsichtigen Auge nicht mehr parallel ist, sondern auf einen Punkt in 50 cm Entfernung vom Patientenauge fokussiert wird. Skiaskopiert der Arzt nun genau aus dieser Entfernung, wird er das für Normalsichtigkeit charakteristische Flackern wahrnehmen. Durch das Vorsetzen der zusätzlichen Linse hat man den Skiaskopierabstand also aus dem Unendlichen in eine bestimmte Entfernung (meist wählt man 50 cm) herangeholt [Grimm (1986)].

## 5 Evaluation

Die Erprobung begann am Ende des Schuljahres 1999-2000 und hat insgesamt ein Jahr gedauert. Es wurden 366 Schülerinnen und Schüler von 17 Gymnasial- und 3 Realschulklassen für die Erprobung herangezogen und in Versuchs- und Kontrollgruppen eingeteilt. Die Lehrkräfte (14 Lehrer und 3 Lehrerinnen) wurden aus dem Kreis der dem Lehrstuhl für Didaktik der Physik bekannten Lehrkräfte gewonnen. Die 9 Lehrer der Versuchsgruppe hatten keine spezifische Unterrichtserfahrung auf dem Gebiet Physik-Medizin.

Es wurde untersucht in wie weit der Einbau medizinischer Themen in den Physikunterricht das Interesse der Schülerinnen und Schüler zum Fach Physik und ihre Bewertung der Bedeutung der Physik verändert und ob sich der Lernerfolg ändert. Darüber hinaus wurde auch die Einschätzung der Lehrkräfte zu einer solchen Veränderung des Physikunterrichts erfragt.

Auf der Grundlage der Erprobungsergebnisse wurden die Unterrichtseinheiten überarbeitet und im Internet interessierten Lehrkräften zur freien Verfügung gestellt ([www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/)).

### 5.1 Methode

Es wurde bei der Erprobung versucht, die übliche, reale Situation in der Unterrichtsumwelt nicht zu ändern, wobei jeder Lehrer die Verantwortung für die Abänderung des klassischen Unterrichts allein tragen soll. Die Lehrer hatten von uns zwar Vorschläge zur Durchführung bekommen, aber sie waren ebenso frei ihre persönliche Art und Weise zu unterrichten einzubringen.

Wir haben die nötigen Materialien und Modelle an der Universität vorbereitet und für den Unterricht zur Verfügung gestellt. Die Modelle sind einfach und ohne besonderen Aufwand gebaut worden, so dass sie in jeder Schule nachgebaut werden können.

Vor und während des Unterrichts war unsere Unterstützung für die Lehrer geringfügig, sodass unser Einfluss auf den Unterrichtserfolg als minimal zu bezeichnen ist. Außerdem wurde keine Vorsensibilisierung der Lehrkräfte hinsichtlich der Wirkung von medizinischen Themen durchgeführt. Lehrerinnen und Lehrer hatten keine ausführliche Information über Begründung, Ziele und Struktur des Arbeitsplanes, die eine positiv einwirkende Grundstimmung bzw. Verfälschung der Ergebnisse liefern konnte. Dies entspricht u.E. einer realistischen Auffassung über die Adaptation von Unterrichtsmaterialien durch Lehrkräfte, die von Didaktikern entwickelt wurden.

Wir haben viele Versuchsklassen aus verschiedenen Schulen für die Erprobung gewählt, und damit teilweise einen Verlust in der Kontrolle während der Erhebung in Kauf nehmen müssen. So wurden z.B. in einigen Klassen die Schüler von ihren Lehrern nicht aufgefordert, ihren Namen anzugeben. Deswegen haben – so der Eindruck – einige Schüler die Fragebögen nicht ernsthaft ausgefüllt und deshalb ist die Validität über die Variablen niedriger geworden. Außerdem standen für die geschlechtsspezifische Untersuchung relativ wenig Probanden zur Verfügung. Andererseits aber konnten dadurch umfangreichere Daten über die Umsetzung des medizinisch orientierten Unterrichtseinheiten gewonnen werden.

#### *Erhebung des Unterrichtsablaufes*

Die Durchführung der Einheiten Mechanik (4.1), Druck (4.2 - 4.3) und Optik (4.4) über medizinische Themen wurde beobachtet und teilweise auf Video aufgenommen. Es sollte festgestellt werden, an welchen Stellen des Unterrichts bei Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten auftreten. Die Unterrichtsbeobachtung ermöglichte es, die Gestaltung der Einheiten, insbesondere der Experimente, zu beurteilen, einen Eindruck über das



vorherrschende Klassenklima zu bekommen und auch eine grobe Einschätzung über das Interesse der Schüler während des Unterrichts zu erhalten. Die Lehrer wurden zusätzlich gebeten, einen Bericht über das Unterrichtsgeschehen zu formulieren, um noch einen weiteren Eindruck über den Unterrichtsablauf zu gewinnen.

#### *Erhebung der Lehrereinschätzung*

Wenn die Lehrer von einem Physikunterricht mit medizinischem Kontext positiv überzeugt sind, können sie auch die Schüler dafür begeistern [Hofer (1997); Ulich (1996)]. Deswegen wurde noch die Einschätzung der Lehrer über ihren Unterricht untersucht. Mit einem Fragebogen wurde getestet, ob die Lehrer überzeugt sind, dass medizinische Themen für eine Verbesserung des Physikunterrichtes geeignet sind. Die Lehrer wurden gefragt, ob ihrer Meinung nach ein Unterricht mit biologisch-medizinischen Themen:

- das Interesse der Schüler erhöhen kann,
- gut an die schulischen Bedingungen angepasst werden kann,
- in der Vorbereitung aufwendiger als ein normaler Unterricht ist,
- für den Lehrer selbst interessanter als ein normaler Unterricht ist.

#### *Erhebung der Interessen*

Die Wirkung der medizinischen Unterrichtseinheiten auf das Interesse wurde hauptsächlich durch die Analyse der Interessenveränderung an Physik untersucht, die durch ein klassisches Vortest-Nachtest-Design angelegt wurde. Die benutzten Items bzw. Fragebogen wurden sowohl vor den eingesetzten medizinischen Einheiten (Vortest) als auch am Ende (Nachtest) mittels einer üblichen bipolaren 5-stufigen Ratingskala bewertet.

Fragebögen mit den gleichen Items wurden in den Kontrollklassen eingesetzt, wobei derselbe physikalische Stoff behandelt wurde. Somit war es möglich, eventuelle Änderungen in den Versuchsklassen mit denjenigen in den Kontrollklassen zu vergleichen.

Da der Interessensbegriff verschiedene Facetten besitzt, wurden für eine möglichst vollständige Erhebung viele Items benutzt, die ein breites Spektrum von Interessensaspekten als Personenmerkmal und Situationsmerkmal abdeckten. Die Items wurden im Wesentlichen in individuelle Interessen (Fach- und allgemeine Interessen) und situationale Interessen (Interessantheit) gruppiert, weil die Grundlage der Interessensuntersuchung das motivationspsychologische Konstrukt von Krapp ist. Die Items können natürlich auch - wenn man ein anderes Konstrukt als Grundlage heranzieht oder einfach andere Überlegungen anstellt - anders gewählt und zusammengestellt bzw. analysiert und interpretiert werden.

Des weiteren wurden sechs Items verwendet, um eventuelle Änderungen der von den Schülern erkannten Bedeutung der Physik zu erheben.

Die direkt auf den Unterricht bezogenen Items zur Schätzung der Interessantheit konnten natürlich nur am Ende der Einheit erhoben werden. Deswegen konnte keine Differenz zwischen Vor- und Nachtest berechnet werden. Es war dann nur möglich einen Vergleich zwischen diesen Items (Interessantheit) bei medizinischem und herkömmlichem Unterricht in derselben Klasse aber auf verschiedenen Stoffgebieten oder auf denselben Stoffgebieten in Versuchs- und Kontrollklassen durchzuführen. Beide Verfahren liefern eine begrenzte Validität, weil die auf die Interessantheit wirkenden aber nicht untersuchten Variablen (z.B. Physikstoff, Lehrer etc.) sehr verschieden sein können und natürlich eine Normierung fehlt.

Die Items bzw. die Fragebögen waren für die verschiedenen Unterrichtseinheiten in der Struktur identisch. Der Fragebogen 3 stammt von Horstendahl (1999), die Fragebögen 4 und 5 und deren theoretische Rechtfertigung stammen aus der IPN-Interessensforschung [Hoffmann et al. (1997)]. Diese drei Fragebögen haben bisher eine breite Verwendung gefunden und eröffnen daher die Möglichkeit, die Ergebnisse unserer Arbeit in einem größeren Rahmen von Forschungsergebnissen einzuordnen und mit Ergebnissen ähnlicher Untersuchungen (z.B. Berger (2000)) zu vergleichen.

Die Fragebögen wurden von der Lehrkraft ausgegeben. Den Schülern wurde mitgeteilt, dass diese Befragung nur zu Forschungszwecken der Universität München dient, damit die Schülerinnen und Schüler ohne Einfluss des Lehrers frei ihre Meinung äußern.

#### *Erhebung des Lernerfolges*

Um die Wirkung der medizinischen Unterrichtseinheiten auf den Lernerfolg untersuchen zu können, haben wir die Schüler einiger Klassen Leistungstests in dem Gebiet Mechanik und Optik unterzogen. Die Leistungstests bestanden aus kleinen Aufgaben mittleren Schwierigkeitsgrades, einerseits um damit eine gute Leistungsdifferenzierung zu gewährleisten, andererseits um auch einen Vergleich mit den bisherigen Noten der Schüler zu ermöglichen. Bei der Auswahl der Aufgaben wurde Sorge getragen, dass die Items möglichst neutral sind, ohne direkten Bezug zu den im Unterricht erarbeiteten Aufgaben, denn weder die Versuchsklassen noch die Kontrollklassen sollten einen Vorteil haben. Deswegen wurde auch kontrolliert, ob keines der Items von einer Klassengruppe auffallend schlecht oder auffallend gut beantwortet wurde.

Die Aufgaben sowohl der Versuchs- als auch der Kontrollklassen wurden von uns korrigiert, damit die Leistungen unabhängig von der Notenbewertung durch die Lehrkräfte neutral bewertet werden und damit objektiv festgestellt wird, ob die Schüler die Lernziele erreicht haben. Weiterhin wurden die Noten der Versuchsgruppe den Noten der Kontrollgruppe gegenüber gestellt, um einen qualitativen Vergleich zwischen den beiden Gruppen zu bekommen. Ein quantitativer Vergleich hat keinen Sinn, weil der Lernerfolg stark von den Vorkenntnissen der Schüler abhängt und diese in den Kontrollgruppen und Versuchsgruppen sehr verschieden sein können.

Die Aufgabe wurden auch von den eigenen Lehrern korrigiert, damit die Beurteilung auch in üblicher Weise vorgenommen wird. Die von den eigenen Lehrern ermittelten Noten wurden dann der letzten Zeugnisnote der Schüler in Physik gegenüber gestellt, um die Leistungsänderung zu untersuchen.

Unsere Ergebnisse wurden mit den von den Lehrern ermittelten Ergebnissen verglichen, um festzustellen, ob daraus die gleichen Schlüsse gezogen werden können.

## 5.2 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Fragebögen wurden nur Schülerinnen und Schüler berücksichtigt, die sowohl den Vor- als auch den Nachfragebogen mitgeschrieben haben. Schülerinnen und Schüler sollten mit einer Ratingskala angeben, inwieweit die Items der gestellten Fragebögen ihre Meinung nach stimmen.

Die Daten wurden mit Hilfe des Programms SPSS analysiert. Die Ergebnisse werden in der Regel durch Mittelwerte verdeutlicht. Die Mittelwertvergleiche wurden durch den t-Test durchgeführt, weil er robust auf mögliche Verletzungen der Voraussetzungen reagiert. Bei den Variablen, die sich bei dem Kolmogorov-Smirnov Test als nicht normalverteilt erwiesen haben, wurden die Ergebnisse durch den Wilcoxon-Test (abhängige Variablen) und den U-Test (unabhängige Variablen) überprüft.

Für die Ergebnisse wird im Folgenden das Signifikanzniveau  $p$  angegeben ( $p \leq 0,05$  wird als signifikant,  $p \leq 0,01$  als sehr (hoch) signifikant,  $p > 0,05$  als statistisch nicht signifikant bezeichnet).

### 5.2.1 Zur Durchführung der Unterrichtseinheiten

Folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die unterrichteten medizinischen Einheiten. Es sind die beteiligten Klassen, der Schultyp, der behandelte Physikstoff, Dauer und Jahreszeit des Unterrichts, sowie die angewendete Unterrichtsmethode angegeben. Für Mechanik und Druck wurde entsprechend der bayerischen Lehrpläne die 8. Jahrgangsstufe, für Optik die 9. Jahrgangsstufe herangezogen.

Klasse	Behandelter Stoff	Stunden	Anfangs-Datum	Unterrichtsmethode
m1, m2, m3 Realschule	Arm Krokodilgebiss Wirbelsäule	8	06.2000	Anwendungsbezogener Frontalunterricht anhand von Modellen und Folien
m4 Gymnasium	Arm Krokodilgebiss Wirbelsäule	30 *	01.2001	Einstieg und Erarbeitung anhand von Modellen und Folien. Lehrerversuche
m5, m7, m8, m10 Gymnasium	Arm Krokodilgebiss Wirbelsäule	10	02.2001	Anwendungsbezogener Frontalunterricht anhand von Modellen und Folien
m11 Gymnasium	Arm Krokodilgebiss	6	04.2001	Erarbeitung anhand von Modellen und Folien
o1 Gymnasium	Fehlsichtigkeiten Untersuchungen am Auge Sehen unter Wasser	8	12.2000	Anwendungsbezogener Unterricht anhand von Modellen und Folien. Schülerversuche
o2 Gymnasium	Fehlsichtigkeiten Untersuchungen am Auge Sehen unter Wasser	6	01.2001	Anwendungsbezogener Unterricht anhand von Modellen und Folien. Schülerversuche
d1, d4 Gymnasium	Atmung Tauchen	8	01.2001	Frontalunterricht anhand von Modellen und Folien. Lehrerversuche
d3 Gymnasium	Atmung Tauchen Schweredruck	12	01.2001	Einstieg und Erarbeitung anhand von Modellen und Folien. Lehrerversuche

\*Die Stundenzahl bezieht sich auf einen gemischt medizinischen und herkömmlichen Physikunterricht.

Für die Mechanik wurden 4 und für den Druck 2 Kontrollklassen ausgewählt. Für die Optik standen keine Kontrollklassen zur Verfügung.

Bei der Erprobung der Einheiten über medizinische Themen trat kein grundlegendes Problem auf. Die Themen konnten ohne Verletzung der Lehrpläne in den Unterricht eingebettet werden. Die Vertiefung anspruchsvoller physikalischer Konzepte wurde beibehalten.

Die Schülerinnen und Schüler haben ein großes Interesse gezeigt. Die direkte Beobachtung des Interesses im Unterricht zeigte keine Abnahme im Laufe des Unterrichts. Allerdings war der Unterricht doch nicht so reichhaltig an Beziehungen zur Medizin, wie von unserer Seite gewünscht. Die Zeit, die insgesamt für Versuche und Beispiele in medizinisch-orientierten Physikunterricht und traditionelle Inhalte in Anspruch genommen wurde entsprach ungefähr der Zeit, die auch im üblichen Physikunterricht benötigt wird.

Viele Versuche wurden nicht optimal durchgeführt. Offenbar war es für die Lehrer auf Grund des Zeitmangels (ohne Unterstützung eines Technikers) und der fehlenden Übung schwierig, den neu gestalteten Unterricht wirklich gut vorzubereiten. Aus den Unterrichtsbeobachtungen gewannen wir jedenfalls den Eindruck, dass der Unterricht noch nicht ausgereift und perfektioniert durchgeführt wurde.

Inhaltspezifische Zusammenfassung des Unterrichtsgeschehens:

#### *Mechanik:*

Der Einstieg anhand des Unterarm-Modells hat sich als sehr sinnvoll erwiesen, denn die Schüler waren durch den praxisnäheren Einstieg im Vergleich zur üblichen „Hebelstange“ leichter zu motivieren. Das wurde auch von zwei Lehrern berichtet, die nicht Teilnehmer an der Erprobung waren, aber die Unterarm- und Krokodilmodelle als Einstieg zur Erhöhung der Aufmerksamkeit benutzt haben.

Die Herleitung des Hebelgesetzes am einseitigen Hebel, repräsentiert durch das Unterarmmodell, hat den Vorteil, dass nicht nur die wirkenden Drehmomente entgegengesetzten Drehsinns, sondern auch die sie hervorrufenden Kräfte entgegengesetzte Richtungen haben, was den komplexen Sachverhalt einsichtiger als beim zweiseitigen Hebel erscheinen lässt. Die anschließende Verifizierung des Hebelgesetzes am zweiseitigen Hebel stellt eine sinnvolle Abrundung der Unterrichtseinheit dar.

Die Lehrer können auf Schwierigkeiten stoßen, wenn sie die zunächst anhand des Unterarmmodells grob festgelegten Begriffe „Kraftarm“ und Drehmoment zu vertiefen versuchen. Selbst bei einem Winkel von  $120^\circ$  zwischen Unter- und Oberarmmodell ist keine signifikante Erhöhung der zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes erforderlichen Muskelkraft festzustellen. Hier muss die Reibung in der Drehlage erheblich reduziert werden. Um den Schülern die genaue Bedeutung des Begriffs „Kraftarm“ näher zu bringen, haben die Lehrer z. B. auf das Fahrrad zurückgreifen müssen.

Das Modell zur Demonstration der zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts erforderlichen Rücken-Muskelkraft bei Personen „mit und ohne Bauch“ sowie beim falschen bzw. richtigen Heben von Lasten mit der daraus jeweils folgenden Belastung für die Wirbelsäule wurde von den Schülern mit großem Interesse aufgenommen. Insbesondere der „herausklappbare Bauch“ hat die Schüler beeindruckt und wesentlich zur Motivation für diese Unterrichtseinheit beigetragen. Die Anwendung des Hebelgesetzes auf die Wirbelsäule fand reges Interesse auch in den Klassen, wo keine Modelle, sondern nur Folien verwendet wurden.

Bei der Statik der Unterkiefer hatten die Schüler und Schülerinnen Schwierigkeiten, die Kaukräfte zu identifizieren. Manche Schüler und Schülerinnen dachten, dass das Gewicht der Beute die einzig wirkende Kraft im Krokodilmaul ist. Wenige Schüler und Schülerinnen halten die Reaktionskraft der Beute für eine wirkende Kraft.

#### *Optik:*

Die Arbeit mit den Augenmodellen hat den Schülern Spaß gemacht. Dies kann auch daran liegen, dass sie eigenständig arbeiten durften.

Die Freude am Experimentieren zeigte sich bei der Erklärung des Augenmodells zur Untersuchung von Fehlsichtigkeiten. Die Schüler probierten zunächst aus, wie weit Gegenstände entfernt sein dürfen, um noch ein Bild aufzufangen. Die beobachtete Unschärfe beim Sehen eines Weit- bzw. Kurzsichtigen machte einige Schüler neugierig und sie erkundigten sich bei fehsichtigen Mitschülern über den Grad der Fehlsichtigkeit und wie sich das auf das Sehen auswirkt. Probleme gab es allerdings dabei, die Arbeit mit dem Modell auf das menschliche Auge zu übertragen, denn die bei der Erprobung (s. Bild 4.3.3.7) benutzten Augenmodelle akkommodieren durch Verlagerung des Hintergrunds (Netzhaut) und nicht wie bei den Menschen durch Veränderung der Linsenkrümmung.

Die Schüler hatten Schwierigkeiten den Hintergrund eines Augenmodells zu beobachten, gaben sich aber Mühe ihn zu finden. Sie fragten nach, ob die angewandte Methode geeignet wäre, den Augenhintergrund beim Menschen zu beobachten und wie Augenärzte vorgehen.

Bei der Einheit „Sehen unter Wasser“ stellte sich der gewünschte Aha-Effekt ein, als das Bild unter Wasser beobachtet werden sollte. Die Schüler waren überrascht, dass sie das Bild wesentlich schlechter sehen konnten. Dadurch waren sie auch motiviert, darüber nachzudenken, wie das Modell verändert werden müsste, um unter Wasser auch scharf zu sehen. Sie waren auch daran interessiert, wie Tiere akkommodieren. Insbesondere fragten sie genauer nach, wie der Kormoran und der Vieraugenfisch dies tun.

#### *Druck:*

Auch wenn der Unterricht frontal durchgeführt wurde, waren die Schülerinnen und Schüler im Wesentlichen interessierte und aktive Teilnehmer. Sie haben viele Frage gestellt (nach der Meinung der Lehrer mehr als beim herkömmlichen Unterricht).

Der Versuch zur Atmung gelang mit zwei Luftballonen als Lungenflügel sehr gut. Er wurde als sehr anschaulich angesehen. Die Schüler fanden ihn sehr interessant. Die Erklärung der Atmungsmechanik erfolgte aber nicht sehr verständlich.

In der Klasse vd3 gab es einige Probleme mit den Demonstrationsexperimente (es wurde nicht geschafft, den Luftballon zum Platzen zu bringen. Denn zuvor ist immer die obere Flasche vom Korken gesprungen. Außerdem wurde der Versuch über das Pneumothorax nicht sehr anschaulich durchgeführt.).

In der Klasse vd4 war insgesamt der Unterricht über den Druck auf Grund der nun größeren Erfahrung der Lehrkraft viel besser geplant und durchgeführt.

## 5.2.2 Einstellung der Lehrer

Um die subjektive Sichtweise der 2 Lehrerinnen und 7 Lehrer der Versuchsklassen zu erfassen, wurde nach der Durchführung der medizinisch orientierten Unterrichtseinheiten der Fragebogen 1 zur Beurteilung des Unterrichts für die Lehrkraft eingesetzt. Die Bewertung erfolgt von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft ganz genau zu).

A)	Im Unterricht mit dem medizinischen Kontext ( <u>Name der Einheit</u> ) hatte ich den Eindruck, dass die SchülerInnen mehr interessiert als im herkömmlichen Unterricht waren.
B)	Unabhängig von dem Ergebnis der Erprobung bin ich überzeugt, dass ein medizinischer Kontext im Physikunterricht geeignet ist, um das Interesse der SchülerInnen am Physikunterricht zu erhöhen.
C)	Den medizinisch orientierten Physikunterricht über ( <u>Name der Einheit</u> ) kann man gut an die schulischen Bedingungen anpassen.
D)	Die Vorbereitung des Unterrichts über ( <u>Name der Einheit</u> ) ist nicht aufwendiger als die Vorbereitung eines normalen Physikunterrichts.
E)	Der Bezug zu medizinischen oder biologischen Fragestellungen macht auch für mich den Physikunterricht interessanter.
F)	Wie schätzen Sie den Lernerfolg in Physik bei der Unterrichtseinheit über ( <u>Name der Einheit</u> ) ein: [ ] besser als üblich                      [ ] wie üblich                      [ ] schlechter als üblich.
G)	Gibt es Ihrer Meinung nach besondere Vorteile oder Nachteile eines medizinisch orientierten Physikunterrichts? Vorteile: Nachteile:

Fragebogen 1 zur Erfassung der Lehrersichtweise über einen Physikunterricht in einem medizinischen Kontext eingebettet.

Das Bild 5.2.2.1 zeigt die Einschätzung über einem medizinischen Physikunterricht von den 9 Lehrern, die einen Physikunterricht über medizinische Themen durchgeführt haben.

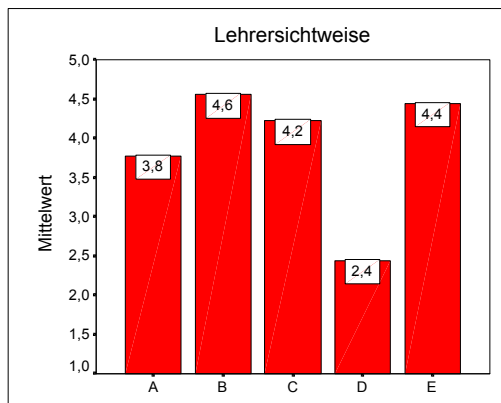


Bild 5.2.2.1: Einschätzung von den Lehrern eines Physikunterrichts über medizinische Themen

Bezüglich der Antworten ist zu bemerken:

- A) Der Eindruck der Lehrer über die Interessantheit der Schüler am Physikunterricht ist positiv.
- B) Die Lehrer sind überzeugt, dass medizinische Themen das Interesse der Schüler erhöhen können.
- C) Medizinische Themen können gut an den Unterricht angepasst werden.
- D) Die Vorbereitung des Unterrichts mit medizinischen Themen ist etwas aufwendiger als der herkömmliche Unterricht. Möglicherweise haben die Lehrkräfte aufgrund ihrer eigenen Begeisterung die für einen gut strukturierten Unterricht erforderlichen Zeitaufwand unterschätzt. (Spätere informelle mündliche Äußerungen deuten dies jedenfalls an.)
- E) Der Bezug zu medizinischen Fragestellungen macht auch für Lehrer den Physikunterricht interessanter.

- F) Bei einem medizinischen Kontext wird von den Lehrern der Lernerfolg genauso groß wie üblich eingeschätzt.
- G) Als besondere Vor- und Nachteile werden genannt:

Vorteile: Der Bezug zum eigenen Körper, so dass Schüler und insbesondere Schülerinnen mehr angesprochen werden und somit das Gelernte besser im Gedächtnis bleibt.

Der Unterricht kann praxisnäher und beispielweise in Verbindung mit dem Biologieunterricht fächerübergreifend gestaltet werden.

Einer gesundheitsbewussten Lebensweise wird in Zukunft allein aus Kostengründen eine erhöhte Bedeutung zukommen. Aufgabe der Schule wird es sein, das Verständnis für eine entsprechende Verhaltensweise zu vermitteln.

Nachteile: Die biologischen Phänomene sind kompliziert und brauchen daher eine starke Vereinfachung. Außerdem wird die quantitativ doch aufwendigere Arbeit schwieriger als beim herkömmlichen Unterricht angesehen.

Da sich die Lehrkräfte selbst erst in die Themen einarbeiten müssen, wird ein erhöhter Zeitaufwand aufgeführt (eine Nennung).

Die Ergebnisse kann man folgendermaßen zusammenfassen:

**Die Lehrerinnen und die Lehrer sind überzeugt, dass medizinische Themen hinsichtlich der Interessensteigerung im Physikunterricht erfolgreich eingesetzt werden können. Bezüglich des Lernerfolgs erwarten sie keine Verschlechterung.**

### 5.2.3 Änderung des Interesses

Die Prüfung erfolgte durch Gegenüberstellung der Interessenmittelwerte vor und nach dem medizinisch orientierten Unterricht und durch den Vergleich mit den Kontrollklassen.

Die statistische Betrachtung wurde unter der vereinfachenden Annahme durchgeführt, dass alle Items gleiche Wichtigkeit besitzen. Allerdings gibt es Items, die wichtige Aspekte des Interesses aufbringen, und Items, die nur Rahmenaspekte ansprechen können. Im Grunde bleiben die Ergebnisse aber gültig, weil in der Interessenanalyse nicht absolute, sondern vergleichende Werte betrachtet werden. In anderen Worten: Wenn die Items verschieden wiegen, tun sie das sowohl in den Vor- als auch in den Nachtests und das für Versuchs- und Kontrollgruppen.

#### 5.2.3.1 Fachinteresse

Das Interesse am Schulfach Physik wurde im Vergleich zum Interesse an den anderen Unterrichtsfächern sowohl vor als auch nach den untersuchten Unterrichtseinheiten erhoben. Die Schüler wurden gefragt, wie interessant sie die Unterrichtsfächer finden (Fragebogen 2). In den Ergebnissen geht die Auswertung von 1 (ganz uninteressant) bis 5 (sehr interessant).

	sehr interessant	interessant	Mittel	weniger interessant	ganz uninteressant
1. Deutsch					
2. Fremdsprachen					
3. Mathematik					
4. Biologie					
5. Kunst					
6. Physik					
7. Sport					
8. Geschichte					

Fragebogen 2 zur Feststellung des Fachinteresses

Bild 5.2.3.1.1 zeigt die üblich leichte Abfalltendenz der Fachinteressen über alle untersuchten Schüler (n = 289) vom Vortest zum Nachtest (linke graphische Darstellung), mit Ausnahme der Biologie. Bei der Versuchsgruppe bleibt die Abfalltendenz des Fachinteresses für alle Fächer (hier auch für die Biologie), ausgenommen aber für das Fach Physik (rechte graphische Darstellung).

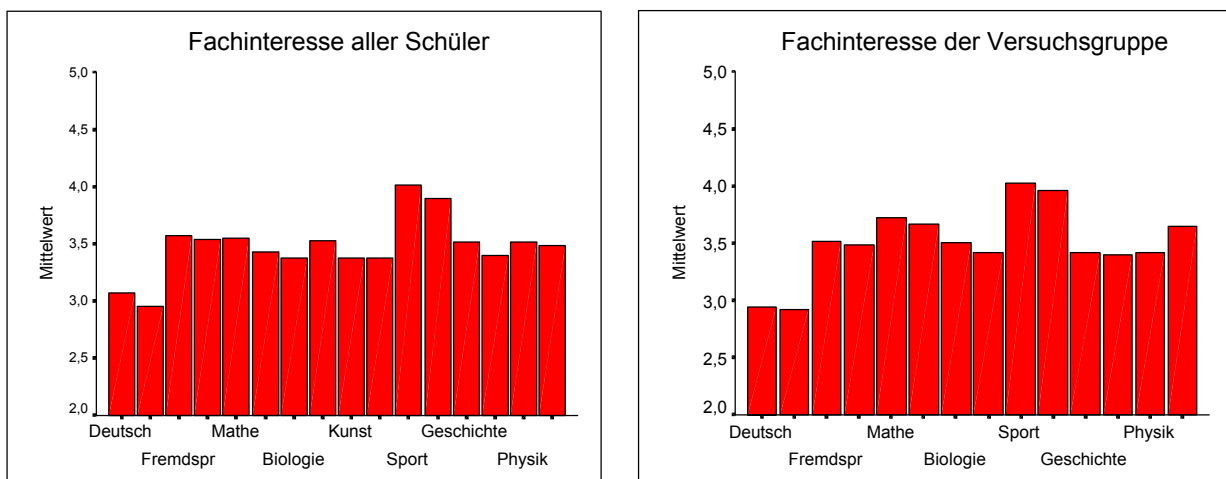


Bild 5.2.3.1.1: Interesse der Schüler an verschiedenen Fächern im Vortest und Nachtest aller Schüler (links) und der Versuchsgruppe (rechts)



Bild 5.2.3.1.2 zeigt die Interessensänderung im Fach Physik für Kontroll- und Versuchsgruppe. Während das Interesse in der Kontrollgruppe sehr signifikant sinkt (von 3,71 auf 3,45;  $n = 103$ ;  $\sigma = 0,77$ ;  $p = 0,010$ ), nimmt das Fachinteresse bei der Versuchsgruppe sehr signifikant zu (von 3,43 auf 3,65;  $n = 190$ ;  $\sigma = 0,95$ ;  $p = 0,002$ ).

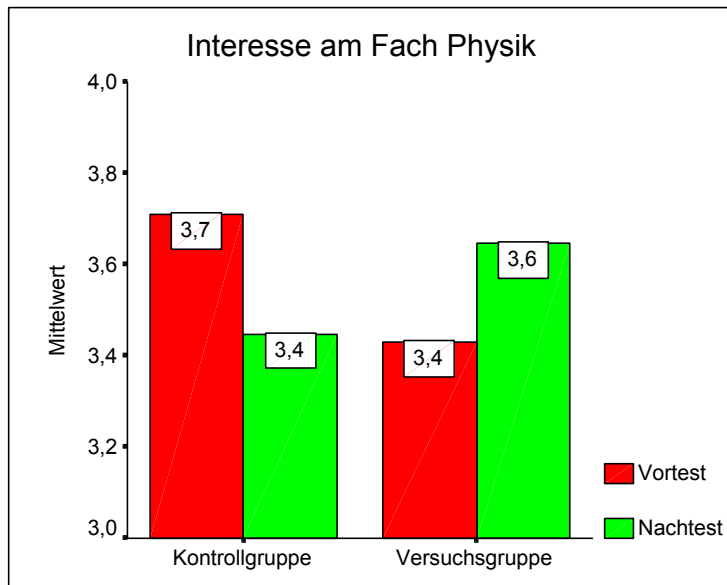


Bild 5.2.3.1.2: Interesse der Schüler an Physik bei der Kontroll- und Versuchsgruppe im Vortest und Nachtest.

Bild 5.2.3.1.3 zeigt das Fachinteresse in Vor- und Nachtest für die Gebiete Mechanik ( $n = 193$ ), Druck ( $n = 63$ ) und Optik ( $n = 37$ ) getrennt. Im Bereich Mechanik ist die Zunahme in der Versuchsgruppe und die Abnahme in der Kontrollgruppe hoch signifikant, im Bereich Optik ist er signifikant (hier gibt es keine Kontrollgruppe). In dem Gebiet Druck sind die Steigerung des Fachinteresses in der Versuchsgruppe und die Abnahme in der Kontrollgruppe statistisch nicht signifikant.

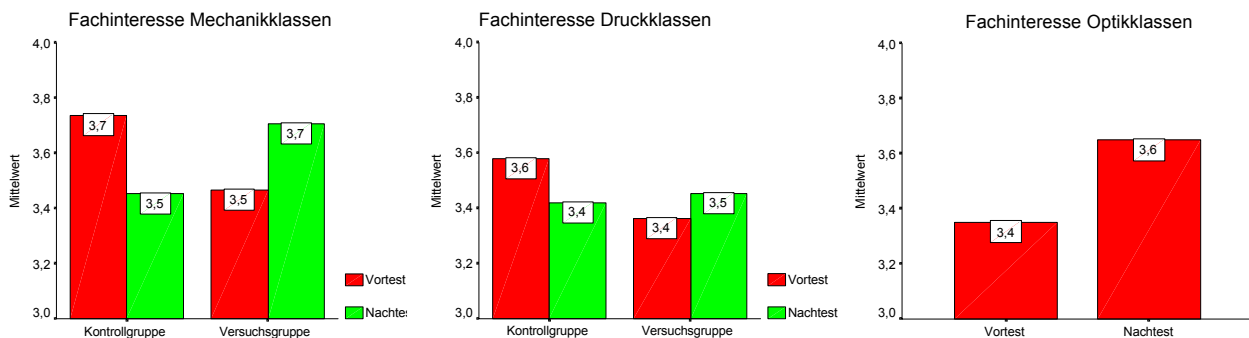


Bild 5.2.3.1.3: Mittelwerte des Fachinteresses für Kontroll- und Versuchsgruppe in den Gebieten Mechanik, Druck und Optik.

Bild 5.2.3.1.4 zeigt das Fachinteresse für alle Klassen getrennt. Das Interesse am Fach Physik steigt bei keiner Kontrollklasse, während es bei allen Versuchsklassen zunimmt, ausgenommen bei der sehr kleinen Klasse vd4 ( $n = 12$ ), bei der das Fachinteresse sinkt (aber statistisch nicht signifikant).

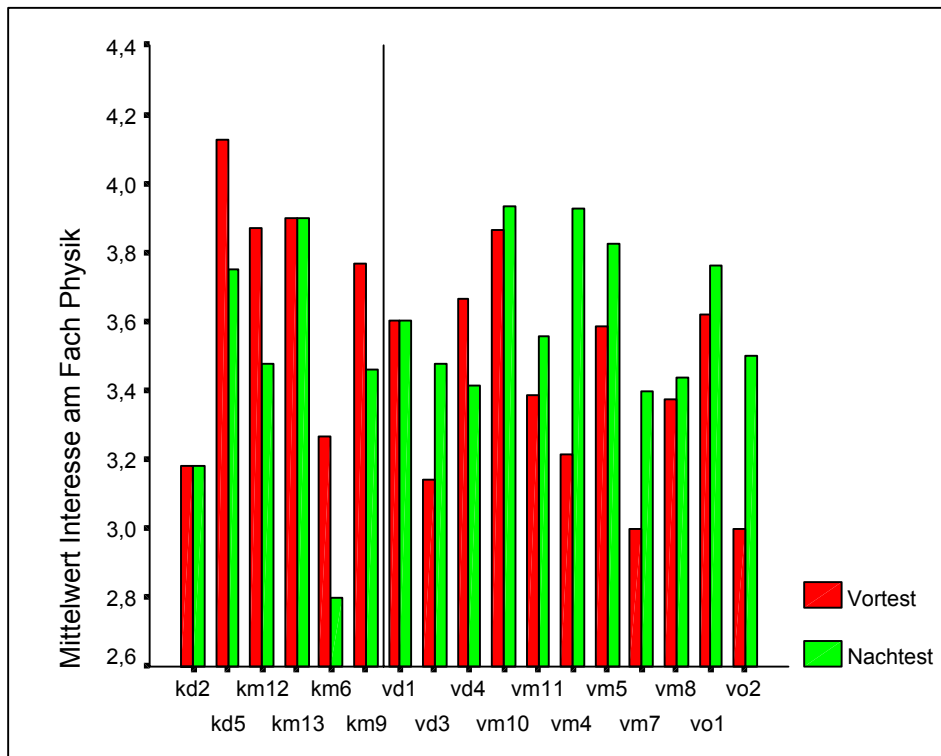


Bild 5.2.3.1.4: Interesse der Schüler an Physik bei Kontroll- und Versuchsklassen im Vortest und Nachtest (k = Kontrollklasse, v = Versuchsklasse, d = Druck, m = Mechanik und o = Optik).

Bild 5.2.3.1.5 veranschaulicht deutlicher die Differenz (Nachtest-Vortest) des Fachinteresses für alle Klassen getrennt.

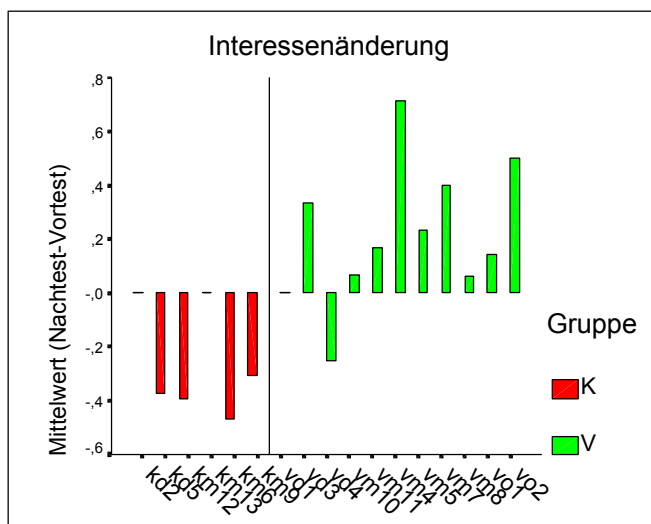


Bild 5.2.3.1.5: Differenz des Fachinteresses zwischen Nach- und Vortest

In der Untersuchung von Berger (2000) in der Oberstufe hatte sich, in Gegensatz zu unserer Untersuchung, keine signifikante Überlegenheit der Versuchsgruppe ergeben.

Bild 5.2.3.1.6 zeigt die geschlechterspezifischen Änderungen am Fach Physik für Kontroll- und Versuchsgruppe. Das Fachinteresse sinkt in der Kontrollgruppe für Jungen und Mädchen, während es für Schülerinnen und Schüler in der Versuchsgruppe in gleichem Maße steigt.

Der empirisch begründete Vorschlag [Häußler & Hoffmann (1990, 1995)], durch einen medizinischen Kontext das Interesse auch der Mädchen zu steigern, wird durch dieses Ergebnis bestätigt.

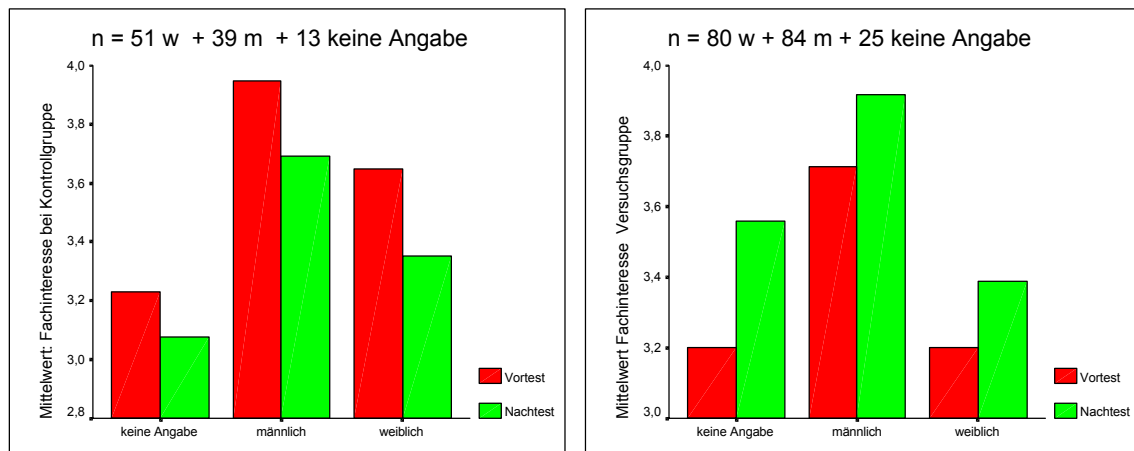


Bild 5.2.3.1.6: Geschlechterspezifische Änderung des Fachinteresses für Schülerinnen und Schüler in Kontroll- und Versuchsgruppe. Die links stehenden Säulen in den graphischen Darstellungen zeigen die Schüler, die ihr Geschlecht nicht angegeben haben.

(Bild 5.2.3.1.7) zeigt die Interessenänderung der Schüler, die in dem Vortest mit „wenig interessant“ bzw. „ganz uninteressant“ geantwortet haben (Schüler, bei denen die Physik also unbeliebt ist) und die Interessenänderung der Schüler, die Beliebtheit im Vortest angegeben haben.

Man erkennt, dass bei der Versuchsgruppe die Steigerung des Interesses bei den anfänglich wenig interessierten Schülern größer als bei der Kontrollgruppe ist. Die interessierteren Schüler zeigen bei der Versuchsgruppe praktisch keinen Verlust an Interesse (Diese Ergebnisse folgen auch für getrennte Auswertungen Mädchen-Jungen). Dieser Umstand führt zur Aussage, dass unser Physikunterricht mit medizinischen Themen zu einer teilweisen Schließung der Schere zwischen interessierten und uninteressierten Schülern führte, aber ohne dass die interessierten Schüler ihr Interesse verloren haben.

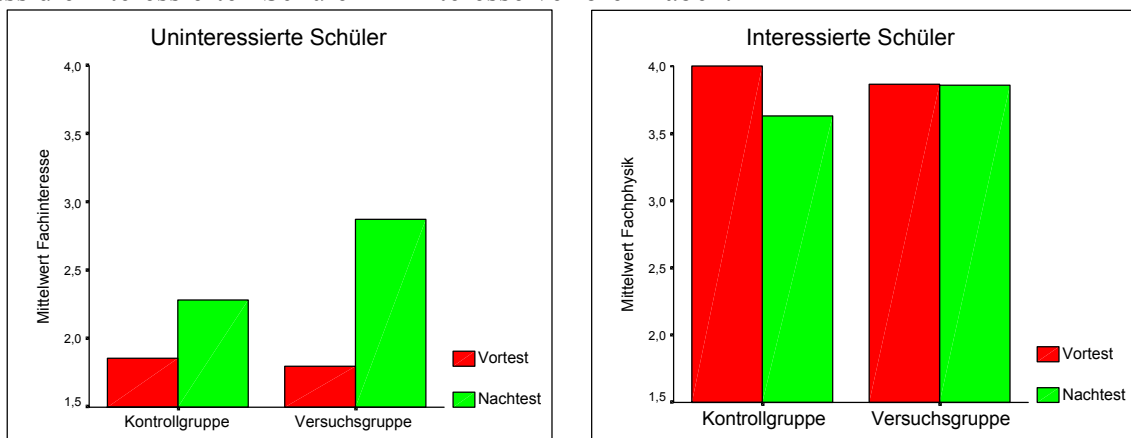


Bild 5.2.3.1.7: Änderung des Interesses an dem Fach Physik für Schülerinnen und Schüler, bei denen die Physik unbeliebt (links) bzw. beliebt (rechts) ist.

Auf Grund der Ergebnisse kann man schließen:

**Das Fachinteresse für Physik wird sowohl bei den Schülerinnen als auch bei den Schülern durch den medizinisch orientierten Physikunterricht im Vergleich zum herkömmlichen Physikunterricht erhöht. Es fördert besonders das Interesse bei den bisher wenig interessierten Schülerinnen und Schüler.**

### 5.2.3.2 Allgemeines Physikinteresse

Fragebogen 3 wurde unverändert am Anfang und am Ende der untersuchten Einheiten eingesetzt, um die mögliche Änderung des Interesses an Physik unabhängig von ganz konkreten Inhalten festzustellen. Die Auswertung erfolgt von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft ganz genau zu) für die positiv gestellten Fragen A, C, D, H und von 5 (trifft gar nicht zu) bis 1 (trifft ganz genau zu) für die negativ gestellten Fragen B, E, F, G und I. Deswegen sind die höheren Zahlen immer als positiver anzusehen.

A) Ich bin sicher, dass ich durch den Physikunterricht etwas mehr über mich selbst erfahre.
B) Die Gedanken, die ich mir über die Themen des Physikunterrichts mache, haben für mich persönlich nur wenig Bedeutung.
C) Ich schätze den Physikunterricht vor allem wegen der interessanten Themen.
D) Physik ist für mich ein Fach, das mir wichtig ist.
E) Es macht mir keinen Spaß, im Physikunterricht über die dort behandelten Themen zu sprechen.
F) Es gibt viele Themen im Physikunterricht, die mir egal sind.
G) Ich finde das, was ich im Physikunterricht lerne, unwichtig für mein weiteres Leben.
H) Über bestimmte Themen des Physikunterrichts denke ich auch in meiner Freizeit nach.
I) Im Physikunterricht werden die Themen in einer Art behandelt, mit der ich wenig anfangen kann.

Fragebogen 3 zur Feststellung des allgemeinen Physikinteresses

Bild 5.2.3.2.1 zeigt das allgemeine Physikinteresse über alle untersuchten Schülerinnen und Schüler aus der Kontroll- und Versuchsgruppe vor und nach dem Unterricht. Das allgemeine Physikinteresse sinkt bei der Kontrollgruppe signifikant (von 3,24 auf 3,10;  $n = 106$ ;  $\sigma = 0,58$ ;  $p = 0,02$ ), während es bei der Versuchsgruppe (von 3,03 auf 3,12;  $n = 260$ ;  $\sigma = 0,66$ ;  $p = 0,02$ ) signifikant zunimmt.

In der Untersuchung von Berger (2000) sinkt das allgemeine Physikinteresse während der zwei medizinischen Unterrichtseinheiten im Trend von 2,9 auf 2,8 nicht signifikant ( $p = 0,10$ ).

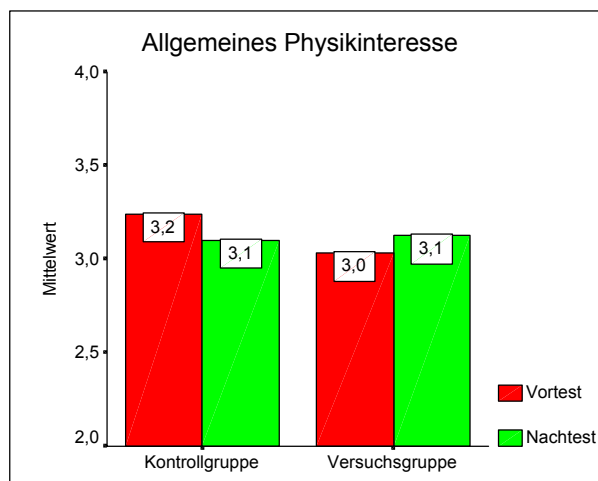


Bild 5.2.3.2.1: Allgemeines Physikinteresse für Kontroll- und Versuchsgruppe vor und nach dem untersuchten Physikstoff.

Bild 5.2.2.3.2 zeigt das allgemeine Physikinteresse aufgeteilt nach Mechanik (Versuchsgruppe  $n = 183$ , Kontrollgruppe  $n = 87$ ); Druck (Versuchsgruppe  $n = 44$ , Kontrollgruppe  $n = 19$ ) und Optik ( $n = 33$ ). In allen drei Gebieten steigt das Interesse in der Versuchsgruppe an (sehr signifikant in der Mechanik), bei der Kontrollgruppe fällt es sowohl im Bereich Mechanik (signifikant) und Druck. Für die Optik gab es keine Kontrollklasse.

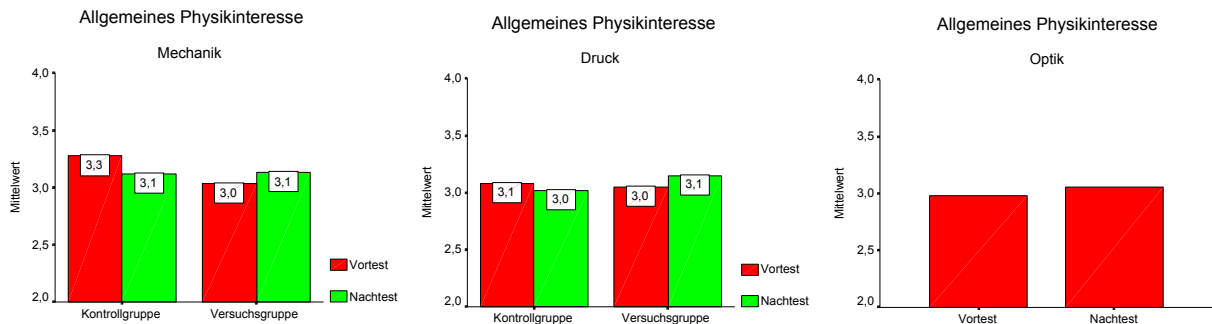


Bild 5.2.2.3.2: Mittelwerte des allgemeinen Physikinteresses für Kontroll- und Versuchsgruppe in den Gebieten Mechanik, Druck und Optik.

Bild 5.2.2.3.3 zeigt die Differenz (Nachtest-Vortest) für jedes Item des allgemeinen Physikinteresses. Zu erkennen ist, dass bei der Kontrollgruppe die Abnahme des allgemeinen Physikinteresses darauf zurück zu führen ist, dass das Interesse bei fast allen Items gesunken ist (allerdings sank es signifikant nur für E: von 3,80 auf 3,52;  $n = 103$ ;  $p = 0,02$  und H: von 2,93 auf 2,66;  $n = 102$ ;  $p = 0,03$ ). Die Steigerung bei der Versuchsgruppe kommt daher, weil das Interesse bei den meisten Items gestiegen ist, allerdings sehr signifikant bei den Items A (von 2,00 auf 2,35;  $n = 259$ ;  $p = 0,00$ ) und I (von 3,19 auf 3,48;  $n = 259$ ;  $p = 0,00$ ).

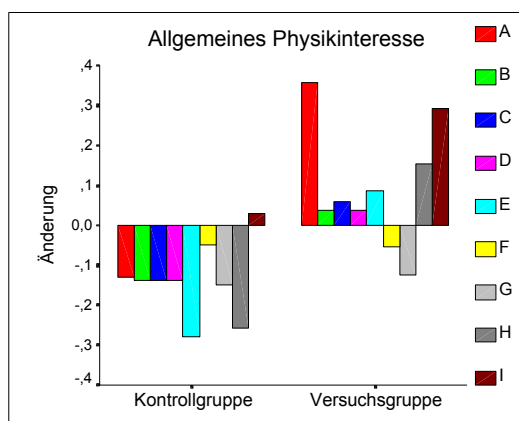


Bild 5.2.3.2.3: Änderung vom Vortest zum Nachtest für jedes Item des allgemeinen Physikinteresses

Bild 5.2.3.2.4 zeigt das allgemeine Interesse an Physik für alle untersuchten Klassen getrennt. Dabei ist statistisch signifikant nur die Zunahme des allgemeinen Physikinteresses der Klasse  $vm_3$  (von 2,27 auf 2,67;  $n = 20$ ;  $p = 0,01$ ).

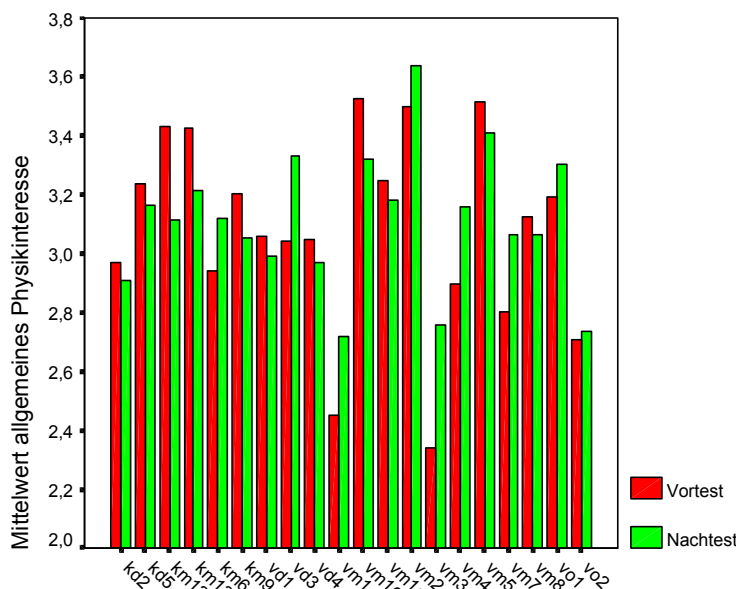


Bild 5.2.3.2.4: Allgemeines Physikinteresse aller Klassen in Vor- und Nachtest.

Bild 5.2.3.2.5 zeigt die Differenz (Nachtest-Vortest) des allgemeinen Physikinteresses für alle Klassen getrennt. Es ist ein besseres Verhältnis (positive Änderungen / beteiligte Klassen) bei der Versuchsgruppe (8/14) als bei der Kontrollgruppe (1/6) zu erkennen.

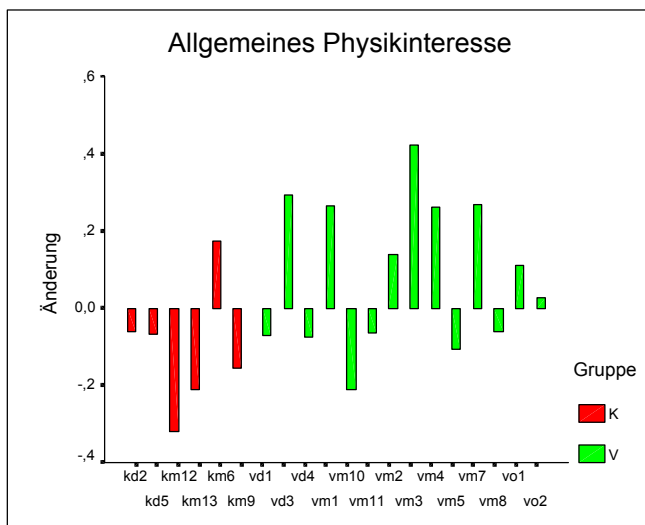


Bild 5.2.3.2.5: Differenz des allgemeinen Physikinteresses zwischen Nach- und Vortest

Bild 5.2.3.2.6 zeigt das allgemeine Physikinteresse geschlechtspezifisch. Man findet in der Kontrollgruppe eine Abnahme sowohl bei Schülerinnen als auch bei Schülern. In der Versuchsgruppe findet man hingegen sowohl für Schüler als auch etwas stärker für die Schülerinnen eine Zunahme. Die Abnahme bei den Schülerinnen der Kontrollgruppe ist signifikant, die Zunahme bei den Schülerinnen der Versuchsgruppe ist ebenso signifikant.

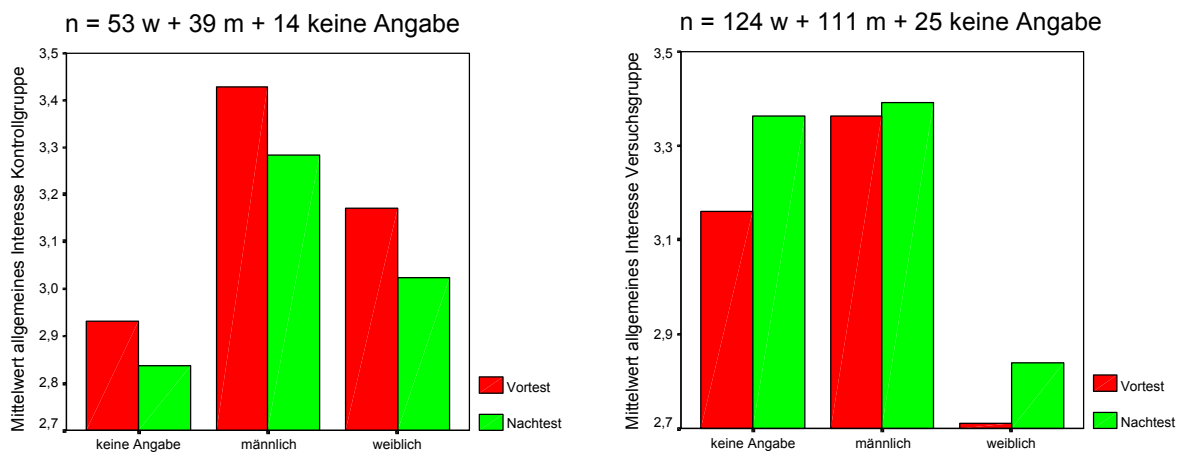


Bild 5.2.3.2.6: Geschlechtspezifisch allgemeines Physikinteresse vor und nach dem Physikunterricht für Kontroll- und Versuchsgruppe. Die links stehende Säule in den graphischen Darstellungen zeigen die Schüler, die ihr Geschlecht nicht angegeben haben.

Bild 5.2.3.2.7 zeigt die Änderung des allgemeinen Physikinteresses bei Kontroll- und Versuchsgruppe.

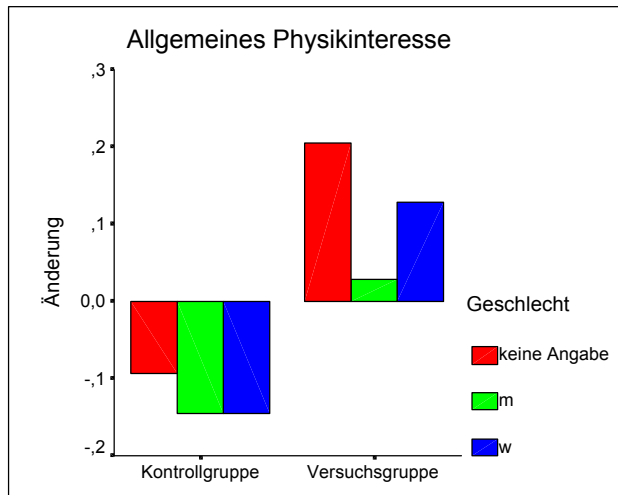


Bild 5.2.3.2.7: Änderung des allgemeinen Physikinteresses für Kontroll- und Versuchsgruppe

Bei der Versuchsgruppe gibt es nur Zunahmen, die bei den Mädchen deutlich höher sind. Bei der Kontrollgruppe gibt es gleich große Abnahmen des allgemeinen Physikinteresses.

Aus den Ergebnissen kann man schließen:

**Das allgemeine Physikinteresse erhöht sich durch den medizinisch orientierten Physikunterricht im Vergleich zum herkömmlichen Unterricht sowohl bei den Schülerinnen als auch bei den Schülern. Beim traditionellen Physikunterricht sinkt es bei den Schülerinnen und Schülern.**

### 5.2.3.3 Interessantheit

Zur Messung der Interessantheit (motivierende Wirkung der Unterrichtseinheit) wurden 19 Items (Fragebogen 4) verwendet. Er wurde von den Schülerinnen und Schülern nach Abschluss der Unterrichtseinheit sowohl in Versuchs- als auch in Kontrollklassen bearbeitet. Die Schüler schätzen die Unterrichtseinheit hinsichtlich der „Interessantheit“ durch Merkmale von situationalem Interesse. Die Auswertung erfolgt von 1 (trifft gar nicht zu) bis 5 (trifft ganz genau zu). Um die Klassen nicht mit einer zu hohen Zahl von Fragebögen zu konfrontieren wurde keine Vorbefragung vorgenommen, was sich im Nachhinein als gravierendes Manko herausstellte.

A. Der Unterricht war abwechslungsreich.
B. Ich war neugierig darauf, was in der nächsten Stunde behandelt wird.
C. Ich bedauerte es, als der Unterricht ausfiel.
D. Der Unterricht beschäftigte sich mit Dingen, die mir im täglichen Leben begegnen.
E. Ich freute mich auf den Unterricht.
F. Im Unterricht gab es etwas Neues für mich zu entdecken.
G. Es gab Dinge, die mich besonders interessiert haben.
H. Ich habe auch außerhalb des Unterrichts über manche Dinge nachgedacht, die im Unterricht behandelt wurden.
I. Ich habe in Büchern nachgeschlagen, um mehr Informationen über das behandelte Gebiet zu bekommen.
J. Ich habe mit Freunden und Freundinnen, Eltern und Geschwistern über Dinge aus diesem Gebiet gesprochen.
K. Ich konnte mich leicht auf die Sache konzentrieren.
L. Ich hatte das Gefühl, für mich selbst etwas dazugelernt zu haben.
M. Die Schule würde mir mehr Spaß machen, wenn wir öfter solche Dinge behandeln würden.
N. Ich wünschte, es gäbe bald eine Fernsehsendung über dieses Thema.
O. Es hat mir Spaß gemacht, mein Verständnis für dieses Thema zu vertiefen.
P. Mit solchen Themen hätte ich mich auch freiwillig gern beschäftigt.
Q. Ich würde über dieses Thema gern noch mehr erfahren.
R. Mein Interesse an Physik ist größer geworden, seit wir diesen Stoff durchgenommen haben.
S. Manchmal fand ich es schade, wenn es klingelte, und die Stunde vorbei war.

Fragebogen 4 zur Messung der Interessantheit des Unterrichts

Bild 5.2.3.3.1 zeigt die Interessantheit für Versuchs- und Kontrollgruppe über alle Items. Der Unterschied zwischen der Interessantheit bei Kontrollgruppe (Mittelwert 2,63;  $n = 93$ ;  $\sigma = 0,71$ ) und Versuchsgruppe (Mittelwert 2,69;  $n = 257$ ;  $\sigma = 0,76$ ) ist statistisch nicht signifikant. Der Vergleich ist aber etwas fragwürdig, weil die Ausgangsbewertung unbekannt ist.

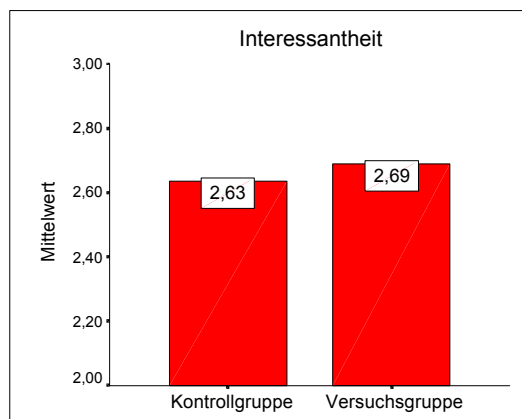


Bild 5.2.3.3.1: Interessantheit für Kontroll- und Versuchsgruppe.

Bild 5.2.3.3.2 zeigt die Interessantheit jeder Klasse an. Wie man sieht ist kein Unterschied zwischen Versuchs- und Kontrollklassen zu erkennen.



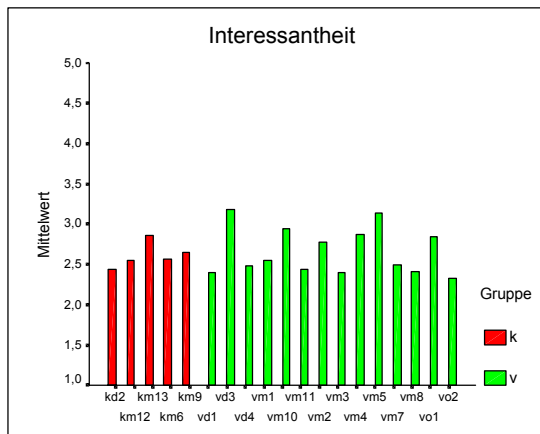


Bild 5.2.3.3.2: Interessantheit jeder Klasse.

Bild 5.2.3.3.3 zeigt die Interessantheit in den drei Gebieten (Mechanik, Druck und Optik) für Kontroll- und Versuchsgruppe. Die geringfügig höhere Interessantheit in der Versuchsgruppe ist im Bezug zur Kontrollgruppe statistisch nicht signifikant. In dem Gebiet Optik wurde die medizinische Unterrichtseinheit mit einer herkömmlichen Einheit derselben Klasse (nachträglich erhoben) verglichen, weil keine Kontrollklasse wegen des spezifischen Themas möglich war.

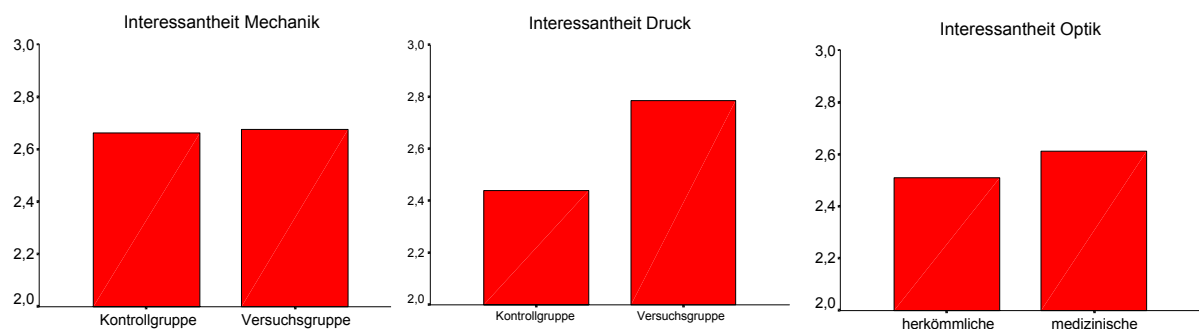


Bild 5.2.3.3.3: Mittelwerte der Interessantheit für Kontroll- und Versuchsgruppe in den Gebieten Mechanik, Druck und Optik.

Bild 5.2.3.3.4 zeigt die Interessantheit als gestapelte Mittelwerte aller Items für Versuchs- und Kontrollgruppe. Auch für die einzelnen Items ist kein statistischer Unterschied zu erkennen.

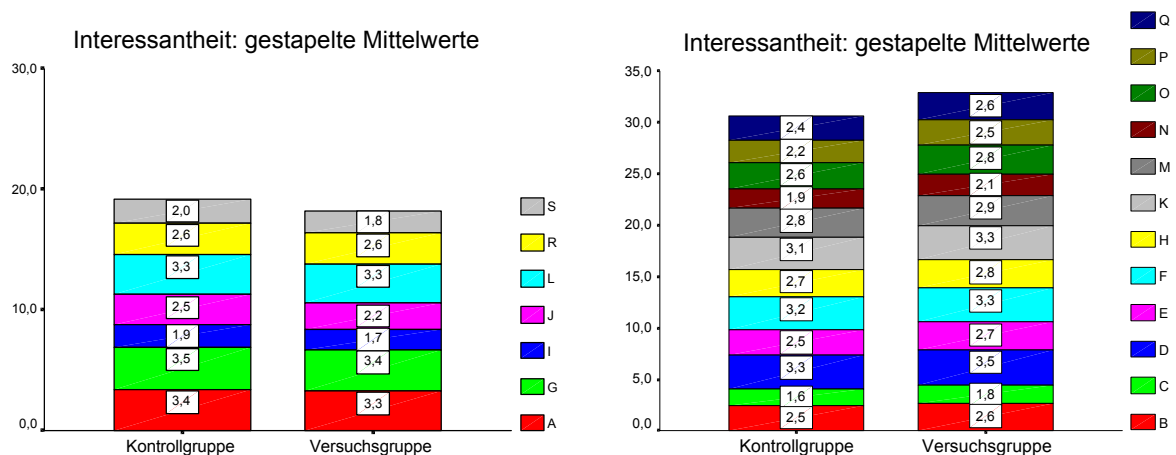


Bild 5.2.3.3.4: Interessantheit für Kontroll- und Versuchsgruppe aus den Mittelwerten von den 19 Items aufeinander gesetzt. In der linken graphischen Darstellung sind die Items dargestellt, die in der Kontrollgruppe überwiegen und in der rechten graphischen Darstellung sind die Items, die in der Versuchsgruppe überwiegen, dargestellt.

Bild 5.2.3.3.5 zeigt den Mittelwert der Interessantheit in Abhängigkeit von den Zeugnisnoten für Kontroll- und Versuchsgruppe (links) und die Anzahl der Schüler (rechts). Während für die Kontrollgruppe die Korrelation (Korrelationskoeffizient  $-0,3$ ) auf dem Niveau von  $0,01$  sehr signifikant ist, ist die Korrelation (Korrelationskoeffizient  $-0,08$ ) für die Versuchsgruppe nicht signifikant ( $p = 0,37$ ; nach Pearson). Die leistungsschwächeren Schüler der Kontrollgruppe sind weniger interessiert am Physikunterricht als die leistungsstärkeren. In der Versuchsgruppe ist die Interessantheit in etwa gleichmäßig verteilt, sowohl die leistungsmäßig erfolgreichen als auch die schwächeren Schüler finden den Unterricht im Kontext Biologie/Medizin interessant.

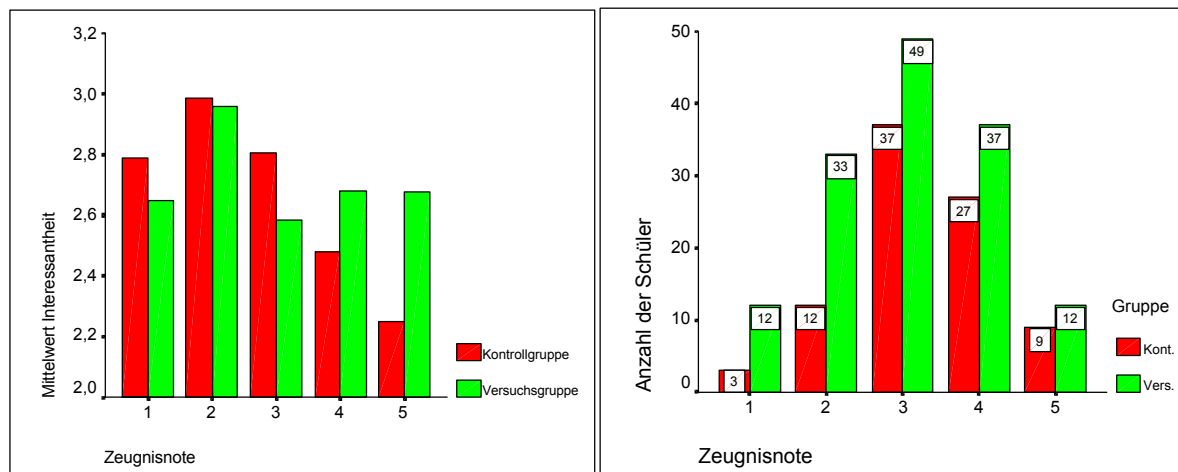


Bild 5.2.3.3.5: Mittelwerte der Interessantheit für Kontroll- und Versuchsgruppe in Abhängigkeit der Zeugnisnote (links). Rechts ist die Anzahl der Schüler in Abhängigkeit der Note aufgetragen.

Bild 5.2.3.3.6 zeigt die geschlechterspezifische Interessantheit in Kontroll- und Versuchsgruppe. Es ist kein Unterschied in der Schätzung der Interessantheit von den Schülerinnen und den Schülern zu erkennen.

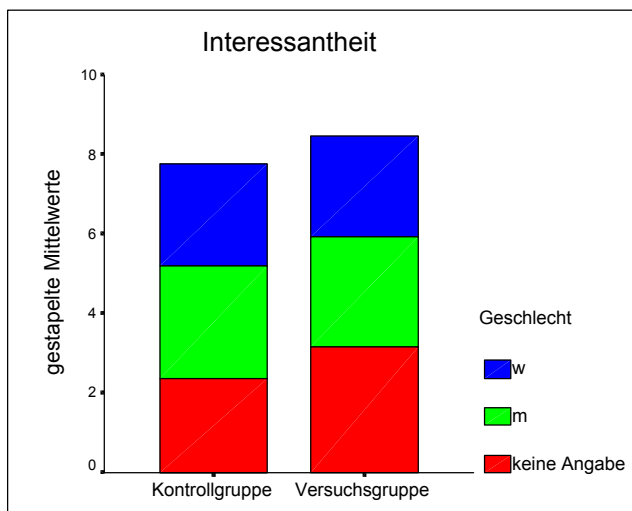


Bild 5.2.3.3.6:  
Geschlechterspezifische  
Interessantheit in Kontroll- und

Diese Ergebnisse lassen die folgende Deutung zu:

**Die Interessantheit des medizinisch orientierten Physikunterrichts ist für die Schülerinnen und Schüler geringfügig größer (nicht signifikant) als die Interessantheit des herkömmlichen Physikunterrichts.**

#### 5.2.3.4 Bedeutung der Physik

Zur Erfassung der Einschätzung der Bedeutung der Physik wurden sechs Aussagen verwendet (Fragebogen 5). Sie dienen zur Bewertung der Bedeutung der Physik für den Alltag, den späteren Beruf und für die Gesellschaft. Die Auswertung erfolgt von 1 (stimmt gar nicht) bis 5 (stimmt vollkommen).

A) Mit Physik kann man viele Vorgänge in der Natur erklären
B) Mit Physik kann man verstehen, wie technische Geräte arbeiten.
C) Mit Physik kann man viele Ereignisse aus dem Alltag erklären.
D) Physik ist für den Beruf, den ich einmal ergreifen möchte, wichtig.
E) Physik hat zahlreiche praktische Anwendungsmöglichkeiten.
F) Physik ist ein Gebiet, das in Zukunft immer bedeutender wird.

Fragebogen 5 zur Einschätzung der Bedeutung der Physik

Bild 5.2.3.4.1 zeigt die Änderung zwischen Vor- und Nachtest der Bedeutung der Physik bei Kontroll- und Versuchsgruppen. In beiden Gruppen ist ein geringfügiger Abfall (statistisch nicht signifikant) zu erkennen (Kontrollgruppe:  $n = 31$  und  $p = 0,07$ ; Versuchsgruppe  $n = 46$  und  $p = 0,16$ ). Die Auswertung bezieht sich auf einen kleinen Stichprobenumfang, denn Schülerinnen und Schüler, die auch nur einen Item des Fragebogens auf „ich weiß nicht“ angekreuzt haben, werden für alle sechs Items als fehlende Fälle berechnet.

Man erkennt, dass die Bedeutung der Physik im Grunde hoch eingeschätzt wird. Deswegen waren größere Verbesserungen vom Vortest zum Nachtest nicht zu erwarten. Das gilt auch für die Versuchsgruppe, weil es kein direktes Item zu biologischen Fragestellungen in dem Fragebogen gibt.

Auch bei der Untersuchung von Berger (2000) ergeben sich sowohl beim traditionellen als auch beim medizinischen Zugang leichte, aber nicht signifikante Verschlechterungen der Bedeutung der Physik.

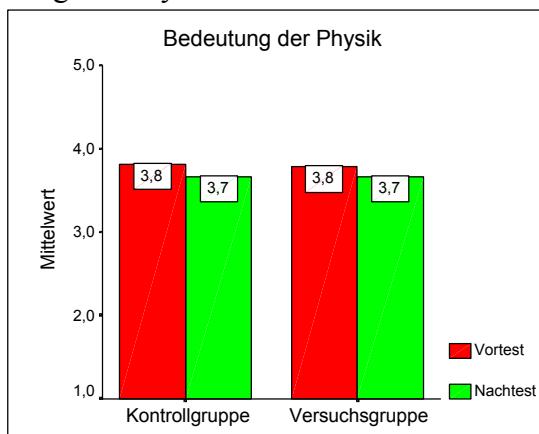


Bild 5.2.3.4.1: Bedeutung der Physik in Kontroll- und Versuchsgruppe in Vor- und Nachtest.

Bild 5.2.3.4.2 zeigt die Einschätzung von den Schülern der Bedeutung der Physik als gestapelte Mittelwerte der Items des Fragebogens im Vor- und Nachtest. Man erkennt, dass sich die Einschätzung im Vortest und im Nachtest sowohl für die Versuchs- als auch für die Kontrollgruppe nicht geändert hat. Bei keinem Item ist die Änderung vom Vortest zum Nachtest statistisch signifikant. Die Tabelle 5.2.3.4.3 gibt die verarbeiteten Fälle für jedes Item an.

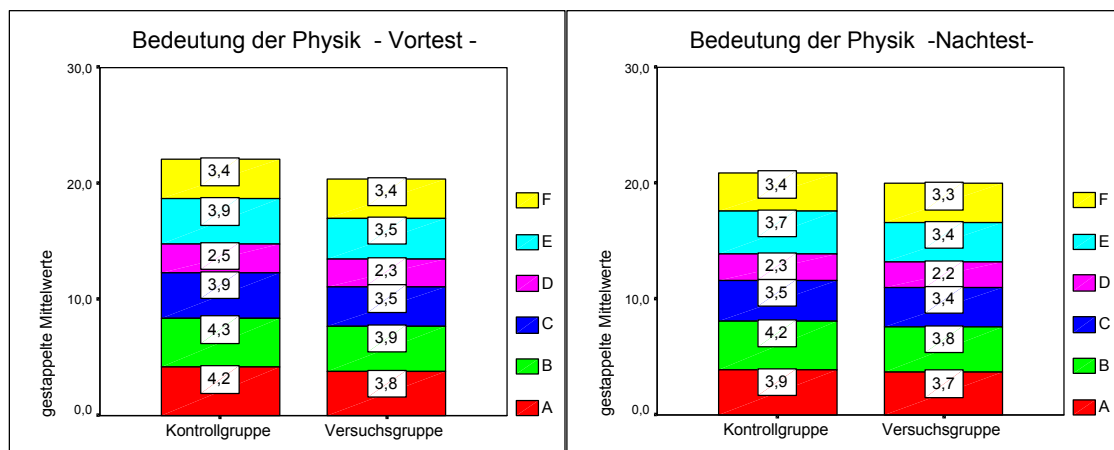


Bild 5.2.3.4.1: Einschätzung der Items von der Bedeutung der Physik in Vortest (links) und Nachtest (rechts).

Item	Gruppe	Gültig	Fehlend
A	k	77	29
	v	122	138
B	k	75	31
	v	117	143
C	k	76	30
	v	121	139
D	k	44	62
	v	77	183
E	k	71	35
	v	110	150
F	k	57	49
	v	99	161

Tabelle 5.2.3.4.3: Verarbeitete Fälle jeder Items der Bedeutung der Physik.

Auf Grund der Ergebnisse kann man schließen:

**Die Bedeutung der Physik bleibt vom Vortest zum Nachtest sowohl in der Versuchs- als auch in der Kontrollgruppe äußerst stabil.**

## 5.2.4 Ergebnisse zum Lernerfolg

Zur Bewertung des Lernerfolgs wurden bei den Inhalten Mechanik und Optik sowohl in den Versuchsklassen als auch in den Kontrollklassen Lerntests ausgegeben. Die Items dienen dazu, das reine Fachwissen und Fachverstehen erfassen zu können und sind deshalb nicht direkt auf den Kontext Medizin bezogen.

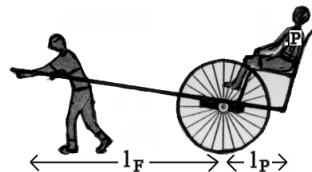
### 5.2.4.1 Lernerfolg in Mechanik

Folgende Aufgaben wurden an die Schülerinnen und Schüler ausgegeben:

- 1) Bei einer Rikscha liegt der Passagierschwerpunkt  $P$  1 m ( $l_P$ ) hinter der Radachse, während der Rikschaläufer 2 m ( $l_F$ ) vor der Achse an den Trageholmen angreift. Der Passagier hat eine Masse von 90 kg. Welche minimale Masse muss der Rikschaläufer besitzen, damit das Fahren möglich ist?

*Antwort:*

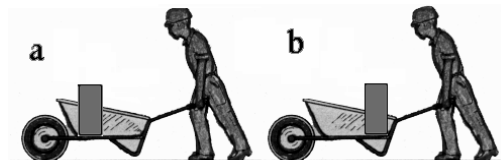
*Begründung:*



- 2) Zwei Schubkarren sind unterschiedlich eingeladen. Welche ist weniger anstrengend zu schieben?

*Antwort:*

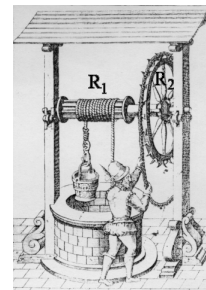
*Begründung:*



- 3) Welche Kraft muss der Mann einsetzen, um Wasser aus dem Brunnen zu schöpfen, wenn die gesamte Masse (Wasser + Eimer) 10 kg ist und die Räder  $R_1$  bzw.  $R_2$  einen Radius von 10 cm bzw. 1 m besitzen?

*Antwort:*

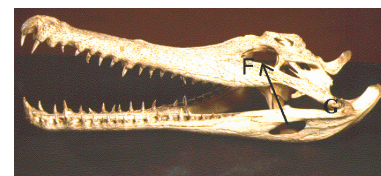
*Begründung:*



- 4) Soll ein Krokodil beim Kauen, um eine kleinere Muskelkraft aufzuwenden, die Beute näher am Gelenk oder am Ende des Maules festhalten?

*Antwort:*

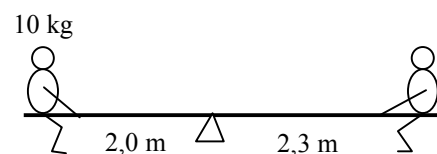
*Begründung:*



- 5) Auf einer Wippe im Gleichgewichtszustand sitzt ein Kind (Masse 10 kg). Wie viel beträgt die Masse eines zweiten Kindes auf dem anderen Sitz, wenn die Hebelarme 2,0 m und 2,3 m sind?

*Antwort:*

*Begründung:*



- 6) Bei einem Krokodil sei der Unterkiefer 20 cm lang und bei einem anderen Krokodil ist er 40 cm lang. Mit welcher Kraft wird ein Fleischbrocken an der Maulspitze festgehalten, wenn die Schließmuskeln 5 cm vom Gelenk entfernt angreifen und in beiden Fällen eine Kraft von 50 N ausüben?

*Antwort:*

*Begründung:*

Bild 5.2.4.1.1 zeigt die mittlere Benotung für jede Aufgabe sowohl in der Versuchs- als auch in der Kontrollgruppe, die von uns durchgeführt wurde. Die Aufgaben 1 bis 5 erhalten bis zu 3 Punkte und die Aufgabe 6 bis zu 4 Punkte. Null Punkte bedeutet, dass die Schüler keine richtige Antwort gegeben haben, 3 Punkte (4 Punkte bei Aufgabe 6) wurden für eine umfassend richtige Beantwortung gegeben.

Wie man aus dem Bild erkennen kann, sind die Punkthöhen der Versuchsgruppe absolut gesehen gut, sie liegen alle in höherem Bereich (von 1,9 bis 2,6). Außerdem wurden in der Versuchsgruppe alle sechs Aufgaben besser gelöst als in der Kontrollgruppe.

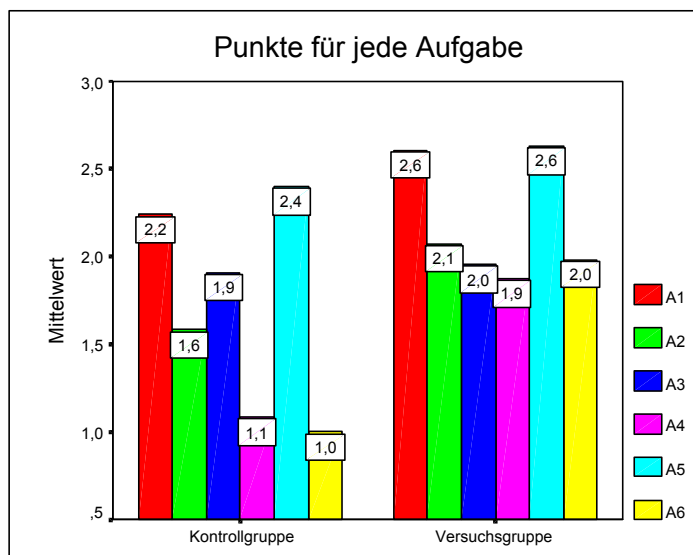


Bild 5.2.4.1.1: Mittlere Punkzahl für die sechs Aufgaben in Versuchs- und Kontrollgruppe. Je höher die Punktezahl, desto besser die Note.

### Mittelwertvergleich

	Gruppe	N	Mittelwert	p
Aufgabe 1	k	60	2,24	,03
	v	88	2,61	
Aufgabe 2	k	60	1,58	,00
	v	88	2,07	
Aufgabe 3	k	60	1,91	,81
	v	88	1,96	
Aufgabe 4	k	60	1,08	,00
	v	88	1,88	
Aufgabe 5	k	60	2,40	,11
	v	88	2,63	
Aufgabe 6	k	60	1,00	,00
	v	88	1,98	

Tabelle 5.2.4.1.2: Vergleich der Punktezahlen der Aufgaben zwischen Versuchs- und Kontrollgruppe. Die Mittelwerte sind höher für die Versuchsgruppe. Die Ergebnisse unterscheiden sich statistisch signifikant für die Aufgabe 1 und sehr statistisch signifikant für die Aufgaben 2, 4 und 6.

Bild 5.2.4.1.3 stellt die Leistungen der Kontroll- und Versuchsgruppe dar, angegeben in der schulüblichen Notenskala. In dem Test haben die Schüler der Kontrollklassen eine Durchschnittsnote vom Lehrer von 3,5 bekommen. Im Vergleich mit der Zeugnisnote (3,4) gibt es eine geringe Senkung der Leistung (statistisch aber nicht signifikant,  $n = 59$ ;  $p = 0,41$ ). Bei den Versuchsklassen nimmt hingegen die Lernleistung signifikant zu (von 2,8 auf 2,6;  $n = 84$ ;  $p = 0,05$ ). Die Erprobung fand bei Versuchs- und Kontrollklassen ungefähr in derselben Jahreszeit statt. Der gleiche Abstand von der Zeugnisbenotung beider Gruppen macht ihre Leistungsänderungen vergleichbar.

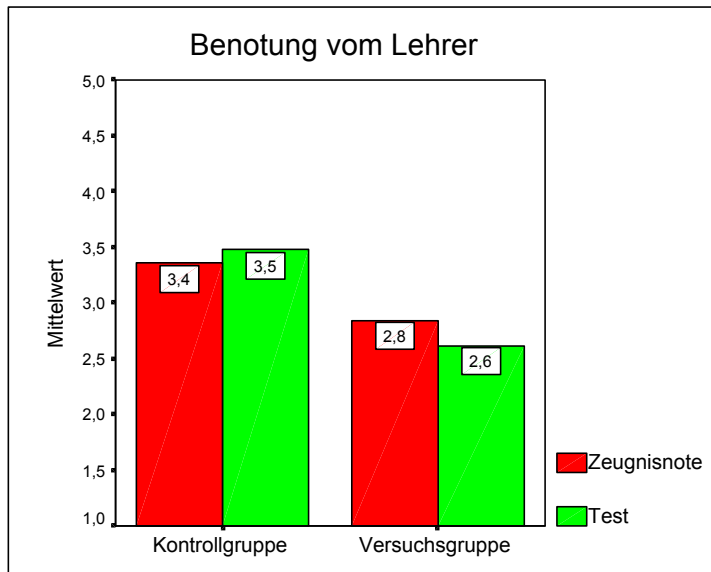


Bild 5.2.4.1.3: Lernleistung im Test und in dem vorherigen Physikunterricht von Schülern der Versuchs- und Kontrollgruppe, angegeben in schulüblicher Notenskala

Bild 5.2.4.1.4 zeigt die geschlechtsspezifischen Leistungsänderungen in der Kontrollgruppe ( $n = 28 \text{ w} + 29 \text{ m} + 2 \text{ keine Angabe}$ ) und in der Versuchsgruppe ( $n = 33 \text{ w} + 48 \text{ m} + 4 \text{ keine Angabe}$ ). Die negativen Mittelwerte in der Versuchsgruppe lassen erkennen, dass sich die Leistung in dieser Gruppe sowohl für die Schülerinnen als auch für die Schüler verbessert hat. Da recht viele Schüler ihr Geschlecht nicht angegeben haben, besitzen die entsprechenden negativen Mittelwerte für die Leistungsänderung in der graphischen Darstellung keine große Bedeutung.

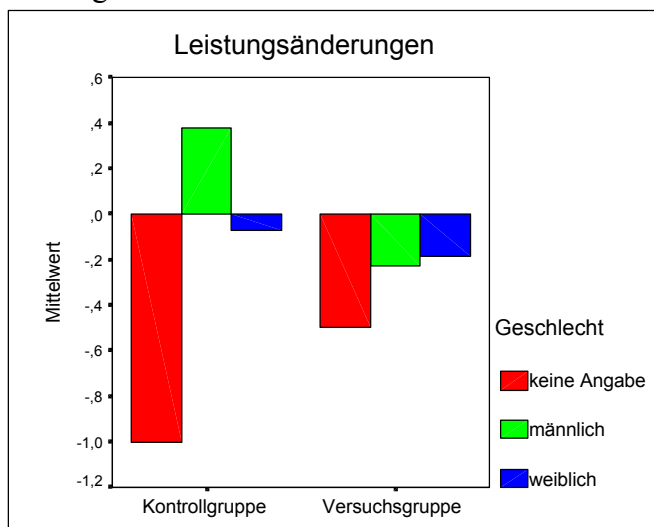
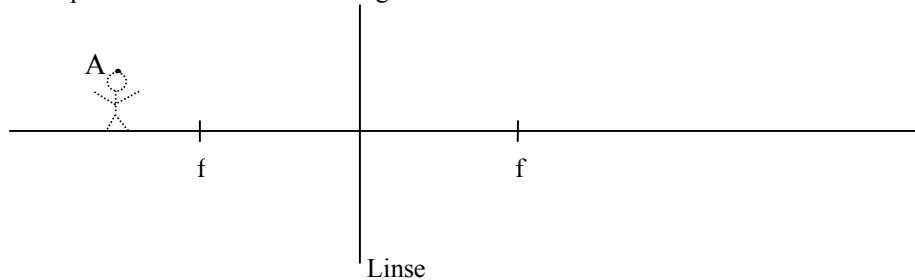


Bild 5.2.4.1.4: Geschlechtsspezifische Leistungsänderungen in Kontroll- und Versuchsgruppe

### 5.2.4.2 Lernerfolg in der Optik

Folgende Aufgaben wurden den Schülerinnen und Schüler der Versuchsgruppe gestellt:

1. Wie kann man bei einer Linse in einfacher Weise feststellen, ob es sich um eine Sammel- oder Zerstreuungslinse handelt?
2. Wie lässt sich die Brennweite einer Sammellinse in einfacher Weise bestimmen?
3. a) Durch eine Sammellinse wird der Gegenstandspunkt A in einen Bildpunkt A' abgebildet. Finde durch Konstruktion heraus, wo ein Schirm aufgestellt werden muss, damit der Bildpunkt A' auf dem Schirm liegt.



- b) Der Abstand Linse – Schirm soll nicht geändert werden. Wenn der Gegenstand etwas näher an die Linse geschoben wird, liegt der Bildpunkt nicht mehr auf dem Schirm. Musst du eine Linse mit größerer oder kleinerer Brennweite nehmen, damit der Bildpunkt wieder auf dem Schirm liegt? Begründe deine Antwort!
4. a) Wie stellt sich das menschliche Auge vom Sehen in der Ferne auf das Sehen naher Gegenstände um?  
b) Wird die Brennweite der Augenlinse beim Nahsehen kürzer oder länger? Begründe deine Antwort!
5. a) Welche Ursache hat die Weitsichtigkeit?  
b) Wie kann sie korrigiert werden?  
c) Beschreibe entsprechend die Kurzsichtigkeit und gib eine Korrekturmöglichkeit an!
6. a) Warum sieht ein Mensch unter Wasser (ohne Taucherbrille) wesentlich schlechter als in Luft?  
b) Sieht man unter Wasser besser mit einem kurzsichtigen oder einem weitsichtigen Auge?
7. Warum ist es nicht möglich den Augenhintergrund zu beobachten, wenn zur Beleuchtung nur eine Taschenlampe zur Verfügung steht?
8. Wie kann man den Augenhintergrund beobachten?



Bild 5.2.4.2.1 zeigt die mittlere prozentuale Punktzahl für jede Aufgabe, die von uns vergeben wurde. Die Punktzahl ging von 0 bis 5 Punkte je nach Aufgabe. Null Punkte bedeutete, dass die Schüler keine richtige Antwort gegeben haben, die höchste Punktezahl wurde für die richtige Beantwortung aller Aufgaben gegeben. Die Bewertung wurde in Prozente umgewandelt (die beste Benotung entspricht 100 Prozent).

Wie man aus dem Bild erkennen kann, sind die Lernergebnisse der Versuchsgruppe recht gut, sie liegen meist deutlich über 50%.

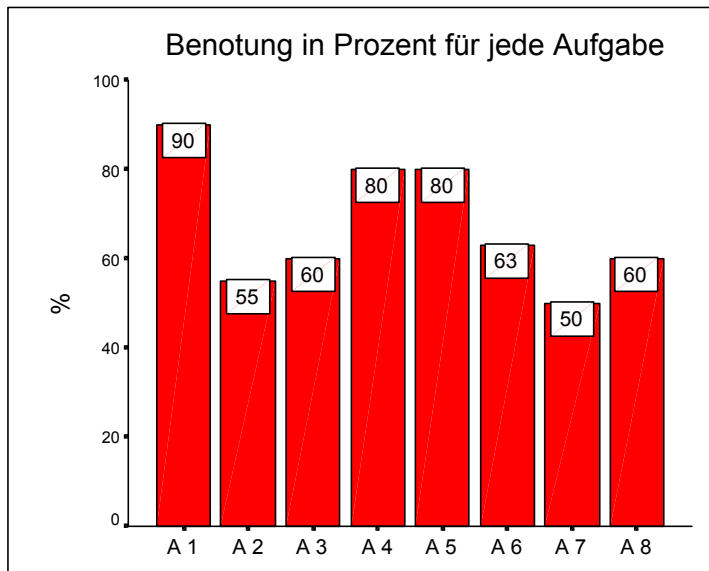


Bild 5.2.4.2.1: Mittlere Bewertung für jede Aufgabe. Je höher die Prozentzahl, desto besser die Note.

Bild 5.2.4.2.2 zeigt die vom Lehrer vorgenommene Benotung dieses Tests im Vergleich zu den Zeugnisnoten in Physik. Man erkennt eine leichte Steigerung der Lernleistung, aber statistisch nicht signifikant, sowohl der Schülerinnen als auch der Schüler (insgesamt von 3,24 bis 3,09;  $n = 33$ ;  $p = 0,44$ ).

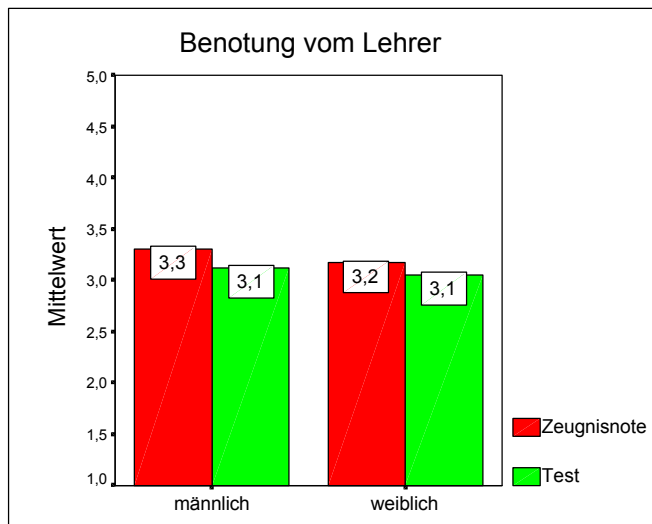


Bild 5.2.4.2.2: Geschlechterspezifischer Vergleich zwischen Noten in dem Test und Zeugnisnoten.

Aus den Ergebnissen der Leistungsuntersuchung zur Optik und zur Mechanik kann man schließen:

**Schülerinnen und Schüler der Versuchsgruppe lernen die zu erzielenden Konzepte recht erfolgreich und sie lernen sie tendenziell besser als die Kontrollgruppenschüler.**

## 5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Bei der Vorbereitung und Durchführung der medizinisch orientierten Einheiten sind keine gravierenden Probleme aufgetreten. Im Unterricht war das Klassenklima locker und die Schülerinnen und Schüler waren aktiv beteiligt.

Die von uns entwickelten und selbst konstruierten Modelle haben sich als gut brauchbar erwiesen, um den medizinischen Hintergrund nicht allzu komplex erscheinen zu lassen.

Keiner der beteiligten Lehrer hat Skepsis gezeigt, medizinische Themen im Physikunterricht einzubringen. Aus dem ausgefüllten Fragebogen geht die Überzeugung der Lehrer hervor, dass der Bezug zu medizinischen Fragestellungen gut an den Physikunterricht angepasst werden kann und sowohl für Schülerinnen und Schüler als auch für die Lehrer selbst interessant sei.

Nach dem Vergleich der Mittelwerte von Interesse und Lernleistung bei Versuchs- und Kontrollgruppen vor und nach dem untersuchten Physikunterricht ist festzustellen:

- Das Interesse am Schulfach Physik sinkt (ca. 8%) sehr signifikant in der Kontrollgruppe, während es in der Versuchsgruppe sehr signifikant zunimmt (ca. 8%) und das sowohl für Schülerinnen als auch für Schüler.
- Das allgemeine Physikinteresse sinkt bei der Kontrollgruppe (ca. 4%) signifikant, während es bei der Versuchsgruppe sowohl für die Schülerinnen als auch für die Schüler signifikant zunimmt (ca. 3%).
- Die Interessantheit ist in der Versuchsgruppe nur ca. 2% größer als in der Kontrollgruppe. Sie lässt sich in den beiden Gruppen kaum unterscheiden. Sowohl bei einer Betrachtung der einzelnen Items als auch bei ihrer gemeinsamen Betrachtung, oder ob auf ein Thema oder auf alle drei bezogen, gibt es keinen statistisch signifikanten Unterschied.
- Die Einschätzung der Bedeutung der Physik sinkt (ca. 3%) sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe. In beiden Fällen ergibt sich aber keine signifikante Änderung.
- Die Lernleistung sinkt ( $n = 59$ ;  $p = 0,41$ ) bei der Kontrollgruppe (ca. 4%) nicht signifikant, während sie bei der Versuchsgruppe (ca. 7%) signifikant zunimmt ( $n = 117$ ;  $p = 0,04$ ). Aufgrund des Vergleichsmodus ist dieses Ergebnis aber mit Vorsicht zu betrachten.

Die Ergebnisse belegen:

### *1. Die neu entwickelten medizinischen Unterrichtseinheiten lassen sich sehr gut realisieren.*

Es ist wichtig, dass sich auch die Lehrer für die Umsetzbarkeit der medizinischen Themen in den Physikunterricht ausgesprochen haben, da die positive Einstellung der Lehrer einen entscheidenden Einfluss auf den Unterrichtsverlauf und den Unterrichtserfolg hat. Außerdem wird es durch die positive Einschätzung der Lehrkräfte für die Zukunft ermöglicht, dass die neuen Einheiten an andere Lehrkräfte weitergegeben werden und in den Physikunterricht integriert werden können.

Sorge macht aber, dass in den Schulen normalerweise ein Techniker als Hilfe für die Lehrer fehlt. Deswegen kann der Bau, selbst einfacher Modelle, für manche Lehrerinnen und Lehrer zu aufwendig sein. Eine partielle Lösung könnte in Zukunft vom Markt kommen, indem realitätsnahe und gut funktionierende Modelle und Versuche, die für interessant gehalten werden, zur Verfügung gestellt werden.

Es ist außerdem für die Lehrkraft nicht einfach, neue Ideen in die Praxis umzusetzen. Lehrerinnen und Lehrer haben sich bereits während ihrer Schulzeit implizit ein Bild des Physikunterrichts gemacht, welches während ihrer Ausbildung weiter entwickelt wurde und welches sie zur Grundlage ihres Unterrichts gemacht haben. Dieses traditionelle Bild kann aus heutiger Sicht einem erfolgreichen Unterricht im Wege stehen. Es wäre dann zu begrüßen, Lehrermate-

rialien über medizinische Themen auf der Ebene der Lehrerbildung und -fortbildung einzusetzen.

## *2. Der auf medizinischen Kontexten basierende Physikunterricht erhöht das Fachinteresse und das allgemeine Physikinteresse.*

Die deutliche Erhöhung des Fach- und allgemeinen Physikinteresses ist ein sehr positives Resultat, weil diese Arten von Interessen sich in früheren Untersuchungen [Berger (2000), dort in zwei medizinischen Einheiten] als äußerst stabil herausstellten. Da diese Einstellungen vor allem langfristig von Bedeutung sind, sind die Veränderungen in der vorliegenden Untersuchung besonders erfreulich.

Beim Vergleich unseres medizinisch-orientierten Unterrichts mit dem herkömmlichen Physikunterricht (d. h. beim Vergleich von Versuchs- mit Kontrollklassen) müssen wir aber feststellen, dass die gemessene Interessantheit in den Versuchsklassen nicht viel größer als in den Kontrollklassen war. Mögliche Ursachen dafür sind:

- Die Interessantheit eines Unterrichts hängt stark von vielen Faktoren ab (z.B. dem Lehrer), die bei jeder Klasse sehr unterschiedlich sein können. Der Einfluss dieser Faktoren steckt in den erhobenen Daten und bei einem Vergleich von absoluten Werten kann er (falls nicht viele Klassen einbezogen werden) nicht getrennt werden. Eine Folgeuntersuchung sollte deshalb ein Kreuz-Design verwenden.
- In der Erprobung wurden viele Versuche nicht erfolgreich durchgeführt. Das kommt z.B. daher, weil die Modelle mit einfachen Mitteln gebaut wurden. Es wäre nötig gewesen, dass die Lehrer den Unterricht vorher erprobt hätten. Zu vermuten ist, dass die Lehrer beim zweiten Mal medizinische Themen besser unterrichten können. Einzelne Rückmeldungen von Schülerinnen und Schülern lassen sich so interpretieren, dass sie den Unterricht im Vergleich zu früheren Stunden als etwas zu unstrukturiert erlebt haben.
- Es muss berücksichtigt werden, dass der herkömmliche Physikunterricht im Laufe von vielen Jahren immer mehr verbessert wurde, während unser Unterricht mit medizinischem Kontext nur seit kurzem besteht und sozusagen im Probelauf ist. Wir verknüpfen mit der Veröffentlichung der Unterrichtsmaterialien die Hoffnung, dass diese durch zahlreiche andere Lehrkräfte verbessert werden und damit weiter gehende Steigerungen des Interesses erreicht werden.

## *3. Die Leistungen der Schülerinnen und Schüler fallen durch einen Physikunterricht über medizinische Themen zumindest nicht schlechter als bei traditionellem Unterricht aus.*

Tendenziell sind im Unterricht mit Kontext Physik und Medizin etwas bessere Lernerfolge als im traditionellen Unterricht erreicht worden. Zumindest kann man behaupten, dass der interessantere Unterricht also entgegen mancher Befürchtung nicht durch einen Verlust an physikalischem Tiefgang und Lernleistung erkauft wird.

## **Schlussbemerkungen**

Die mangelnde Lernmotivation für Physik ist ein vielschichtiges, multifaktorielles Problem. Es gibt daher keine einfachen Patentlösungen, um das Schulfach attraktiver zu machen. Viele Faktoren (wie z.B. die Kompetenz der Lehrer oder das Gelingen von Versuchen) können aber zur Herstellung von für den Unterricht wichtigen Bedingungen (wie Begeisterung, Spaß und Interesse) beitragen.

Wegen ihrer inhaltlichen Relevanz können medizinische Themen sehr gut im Physikunterricht eingesetzt werden, denn sie gewährleisten einige dieser Bedingungen direkt (z.B. Interesse) oder indirekt (z.B. Sympathie zum Lehrer) ohne eine Verschlechterung anderer Faktoren (z.B. der Erklärungsfähigkeit) herbei zu führen.

Wir wissen zur Zeit nicht, ob ein Physikunterricht mit medizinischem Kontext über das ganze Jahr wieder langweilig für Schülerinnen und Schüler wäre. Wenige Betrachtungen über den menschlichen Körper erhöhen aber sicher durch ein interessantes Gebiet die Variation des Unterrichts und dies stößt bei den Schülern auf mehr Akzeptanz.

Wir würden es sehr begrüßen, wenn die Unterrichtsvorschläge in dieser Arbeit eine Hilfe für die Lehrer ist und die insgesamt positive Wirkung weitere Lehrkräfte dazu bringt, einen für die Schülerinnen und die Schüler interessanteren Physikunterricht anzubieten.

## Literaturverzeichnis

- ALEXANDER K. (1993): Gefäßkrankheiten, München: Urban u. Schwarzenberg
- BARTELS H.; Bartels R. (1998): Physiologie, München: Urban u. Schwarzenberg
- BEIER W. (1973): Lehrbuch der Physik für Mediziner und Biologen, Leipzig: Teubner
- BEINKE L.; Richter H. (Hrsg.) (1993): Mädchen und Physikunterricht. Revision eines Lehrplanes in der Realschule, Bad Heilbrunn
- BENEDEK G. B.; Villars F. (2000): Physics with illustrative examples from medicine and biology, (mechanics), New York: Springer Verlag
- BENNINGHOFF A. (1994): Anatomie, München: Urban & Schwarzenberg
- BERGE Q. E.; Duit R. (2000) Den Physikunterricht effektiver und erfreulicher machen, PdN-Physik, 1/49, S. 9-13
- BERGER R. (2000): Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik - Ein Weg zu interessantem Physikunterricht, Berlin: Logos
- BERGMANN L. (1990): Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 1, Berlin: de Gruyter
- BERGMANN M.; Kleine G. (1982): Ein einfaches Phonokardiogramm im Unterricht, Unterricht Biologie 6/76, S. 46 - 47.
- BERTSCH A. (1997): In Trockenheit und Kälte, Ravensburg
- BETZ U.; Hopf C.; Bodem F. (1998): Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen mittleren Sitzhaltungen – eine prospektive kontrollierte Studie, Krankengymnastik 50/11, S. 1871-1882
- BEZZEL E.; Prinzingen R. (1990): Ornithologie, Stuttgart: Ulmer
- BILLE G.; Schlegel W. (1999): Medizinische Physik 1, Berlin: Springer
- BITTMAN F.; Müller W.; Winter R. (1998): Medizin und Physik, Stuttgart: Klett Verlag
- CAMPENHAUSEN C. von (1993): Die Sinne des Menschen, Stuttgart: Thieme
- CLEUREN J.; Aerts P.; De Vree F. (1995): Bite and joint force analysis in caiman crocodilus, Belg. J. Zool. – Volume 125, S. 79-94
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (1998): Wärmeübertragung bei Tieren. Unterrichtsvorschläge für einen fachübergreifenden Unterricht, Physik in der Schule 36 (6), S.211-216
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (1999a): Schweredruck des Blutes im menschlichen Körper, Physik in der Schule 37 (1), S. 14-19
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (1999b): Infusionen und Transfusionen, Physik in der Schule 37 (2), S. 81-87
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (1999c): Das Stethoskop in der ärztlichen Praxis und im Physikunterricht, Physik in der Schule 37 (5), S. 296-302
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (2000a): Zur Statik des menschlichen Körpers im Physikunterricht, Physik in der Schule 38 (1), S. 11-17
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (2000b): Statik des Kauapparats von Reptilien und Säugetieren, MNU 53 (3), S. 158-163
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (2000c): Wie Fische sehen, Physik in der Schule 38 (3), S. 157-161
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (2000d): Der Augenspiegel, PdN-Ph 7/49, S. 7-12
- COLICCHIA G.; Wiesner H. (2000e): Physik und Medizin, Tagungs-CD, Dresden, Berlin: Sehmans
- COLICCHIA G.; Wodzinski R.; Wiesner H. (2000f): Die Physik von Stenose und Aneurysma, PdN-Ph, 7/49, S. 2-6
- COLICCHIA G.; Müller R.; Wiesner H. (2001a): Physik und Medizin: Augenärztliche Verfahren im Physikunterricht, Tagung in Berlin
- COLICCHIA G.; Künzl A.; Wiesner H. (2001b): Einfache Augenmodelle zur Demonstration der Abbildung im Auge, PdN-Ph 8/50, S. 45-47
- CARROL R. L. (1988): Vertebrate Palentology and Evolution, New York: Freeman
- DEBRUNNER A. M. (1985): Orthopädie, Stuttgart: H. Huber Verlag

- DECI E. L.; Ryan R. M. (1993): Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik, Z. f. Päd., 39/2, S. 223-238
- DEETJEN P.; Speckmann E.J. (1994): Physiologie, München: Urban und Schwarzenberg
- DUIT R. (1999): Das Lernen von Physik verbessern, Unterricht Physik 10 (54), S. 230-232
- DUKE J. B. (1997): Animal Physiology, Cambridge University Press
- DUNCKER L.; Popp W. (1998) (Hrsg.): Fächerübergreifender Unterricht in der Sekundarstufe I und II, Bad Heilbrunn: Klinkhard
- DUPUIS H. (1990): Über Wirkung mechanischer Schwingungen auf die Wirbelsäule, Orthopädie N. 19, S. 140-145
- ENDRES P. (Hrsg.) (1982): Farbatlanten der Medizin, Band 4: Atmungsorgane, Stuttgart: Thieme
- EULER M. (1982): Physikunterricht - Anspruch und Realität, Frankfurt am Main/Bern
- FAIßT W.; u.a. (1994): Physik-Anfangsunterricht für Mädchen und Jungen, Kiel
- FREWEIN J. (Hrsg.) (1994): Anatomie von Hund und Katze, Berlin: Blackwell
- GABLA J. (1982): Injektion- und Infusionstechnik, Berlin: de Gruyter
- GOLENHOFER K. (2000): Physiologie heute, München: Urban u. Fischer
- GREHN F. (1998): Augenheilkunde, Berlin u. a.: Springer Verlag
- GRIMM W.; Ucke C.; Friedburg D. (1986): Strichskiaskopie, Stuttgart: Enke
- GUNNACKER E.; Lex E. (1998): Wie beliebt und interessant sind die einzelnen Fachgegenstände aus der Sicht des Schülers? Unser Weg 53(1998), S. 161
- HAAS U. (1988): Physik für Pharmazeuten und Mediziner, Stuttgart: Wiss. Verl. - Ges.
- HADEMENOS G. (1995): The physics of cerebral aneurysms, Physics Today, Febr., S. 24-30
- HAID-FISCHER F. (1995): Gesunde Beine ein Leben lang, Stuttgart
- HARTEN H. (1999): Physik für Mediziner, Berlin: Springer
- HARTINGER A. (1997): Interessenförderung, Kiel: IPN
- HARTMANN H.; Schardt A.; Pangert R. (1996): Wirbelsäule Belastungen und ihre Häufigkeit und Dauern in unterschiedlichen Berufen, Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed. 31/5, S. 213-216
- HÄUßLER P. (1983) et al.: Physikalische Bildung für heute und morgen. Ergebnisse einer curricularen Delphi-Studie, IPN Kiel (Beilage zu der Zeitschrift Praxis der Naturwissenschaften 1983, Heft 12)
- HÄUßLER P. (1987): Measuring student's interest in physics – design and results of a cross-sectional study in the federal Republic of Germany, Inter. Journal of Science Education, Vol 9, N. 1, S. 79- 82
- HÄUßLER P. (1996) et al.: Qualitative Unterschiede im Interesse an Physik und Konsequenzen für den Physikunterricht, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 2/3, S. 57-69
- HÄUßLER P.; Hoffmann L. (1990): Wie Physikunterricht auch für Mädchen interessant werden kann, Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 1/1, S. 12-18
- HÄUßLER P.; Hoffmann L. (1995): Physikunterricht - an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert, Unterrichtswissenschaft N. 2, S. 107-126
- HÄUßLER P.; Hoffmann L. (1998): Chancengleichheit für Mädchen im Physikunterricht - Ergebnisse eines erweiterten BLK-Modellversuchs, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 4/1, S. 51-67
- HÄUßLER P. et al. (1998): Perspektiven für die Unterrichtspraxis, Kiel: IPN
- HECKEHAUSEN H. (1993): Motivation and action, Berlin u. a.: Springer
- HEDEWIG, R. (1990): Körpertemperatur und Fieber, Unterricht Biologie 158/14, S. 21-25
- HELLENTHALL W. (1997): Physik für Pharmazeuten, Mediziner und Biologen, Stuttgart: Fischer
- HELMHOLTZ H. (1851): Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge, Berlin: A. Förstner'sche Verlagsbuchhandlung

- HEMPEL G. (1997): Leben in Meereis, Naturw. Rdsch., Heft 2, S. 43-49.
- HIERHOLZER K.; Schmidt R. (Hsg.) (1991): Pathophysiologie des Menschen, Weinheim: VCH
- HOBBS H.; Aurora T. S. (1991): Biomechanics of the spine, Phys. Educ., S. 99-103
- HOFER M. (1997): Lehrer-Schüler-Interaktion. In: Weinert F. (Hrsg.), Physiologie des Unterrichts und der Schule, Göttingen: Hogrefe
- HOFFMANN L.; Lehrke M. (1986): Eine Untersuchung über Schülerinteressen an Physik und Technik, Zeitschrift für Pädagogik N. 32, 189-204
- HOFFMANN L. (1990): Mädchen und Physik - ein drängendes Thema, Naturwissenschaften im Unterricht, 1/1, S. 4-11
- HOFFMANN L.; Häußler P.; Peters-Haft S. (1997): An den Interessen von Mädchen und Jungen orientierter Physikunterricht, Kiel: IPN
- HORN E (1982): Vergleichende Sinnesphysiologie, Fischer: Stuttgart
- HOHRSTENDAHL M. (1999): Motivationale Orientierungen im Physikunterricht, Berlin: Logos
- IODANSKI N. N.: The jaw muscles of the crocodiles and some relating structures of the crocodilian skull, Anat. Anz. Dd., S. 256-280 (1964)
- JÄGER M.; Lutmann A.; Lauriz W. (1990): Die Belastung der Wirbelsäule beim Handhaben von Lasten, Orthopädie N. 19, S. 132-139
- RENSBURG Jansen B. G. van (1994): Mundbiologie, Berlin
- JOHANSEN K. (1982): Aneurysmen - gefährliche Aussackung der Arterien, Spektrum der Wissenschaften, Sept., S. 52-61
- JUNG W. (1992): Hat der Physikunterricht eine Zukunft? Überlegungen zum Verhältnis von Physik und Technik, Polikopie
- KAMKE D.; Walcher W. (1982): Physik für Mediziner, Stuttgart: Teubner.
- KANE J.; Sternheim M. (1978): Life science physics, New York : Wiley
- KLEESATTEL W. (1999): Überleben in Eis, Wüste und Tiefsee, Darmstadt: Wiss. Buchges.
- KLINKE R.; Silbernagl S. (1996/2000): Lehrbuch der Physiologie, Stuttgart: Thieme
- KRAPP A.; Prenzel M. (Hrsg.) (1992): Interesse, Lernen, Leistung – Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung, Münster: Aschendorf Verlag
- KRAPP A. (1996): Psychologische Bedingungen naturwissenschaftlichen Lernens: Untersuchungsansätze und Befunde zu Motivation und Interesse. In: R. Duit, Ch.v. Rhöneck: Lernen in den Naturwissenschaften, Kiel
- KRISTEL K. H. (1995): Pflege in der Therapie und Praxis, Stuttgart
- KRUSE H.: Der Blutdruck, Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 1(1990) Heft 5, S. 27-34
- KUCHER H.; Richter R. (1991): Tauchen, Berlin: Sportverlag
- LARSEN T. (1980): Die Welt der Eisbären, Hannover: Landbuch-Verlag
- LAUX G. (1986): Spaß am Physikunterricht – ein didaktisches Anliegen, NiU-PC 34(18), S. 326-330
- LECHNER H. (1992): Jungen und Mädchen im Physikunterricht, Didaktik der Physik - Vorträge, S. 223-227
- LEHRKE M. (1988): Interesse und Desinteresse am naturwissenschaftlich-technischen Unterricht, Kiel: IPN
- LILLYWHITE H. B. (1989): Der Blutkreislauf von Schlangen und die Schwerkraft, Spektrum der Wissenschaft, Heft 2
- LUTTICKEN von G. F. (1999): Der Blutkreislauf als Einstieg in die Hydrodynamik, Unterricht Physik 10/49, S. 28-31
- MEYER L. (1993): Physik und Medizin. Arbeitsmaterialien für den Physikunterricht der Gymnasialen Oberstufe, PLIB-Werkstattheft
- MONTESANTI M. I. (1985): Fisica Clinica e Biologica, Mailand: Ambrosiana

- MOJETTA A.(1997): Haie, Hamburg: Jahr
- MÜLLER W. (1997/98): Erprobungsmaterialien zum Wahlkurs „Physik und Medizin“, unveröffentlichtes Material der Universität Potsdam, Physikdidaktik
- MÜLLER W.: Evaluation des Wahlkurses Physik und Medizin der gymnasialen Oberstufe. In: Behrendt, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997, Leuchtturm-Verlag, Alsbach 1998.
- MÜLLER W. (1998): Impulse Physik 2. Medizin + Physik, Stuttgart: Klett
- MÜLLER, W. A. (1998): Tier- und Humanphysiologie, Berlin: Springer
- MÜLLER-ECKHARDT C. (Hrsg.) (1988): Transfusionsmedizin, Berlin: Springer
- NÄGEL H. ; Kubein-Meesenburg D. (1987): Zur Biomechanik des Menschen, Didaktik der Physik -Vorträge, Tagung, S. 215-222
- NAUMANN G. (Hrsg) u.a. (1981): Ophthalmologisch-optische Untersuchungsgeräte, Stuttgart: Enke
- NOVER A. (1970): Der Augenhintergrund, Stuttgart: Schattauer Verlag
- PAQUET K. J.; Dieckhöfer K. (1993): Allgemeine physikalische und klinische Untersuchungen, Berlin
- PARRAMONT (1997): Der menschliche Körper, Augsburg: Bechtermünz Verlag
- PAGONIS V. et al. (1999): Modeling Forces on the Human Body, The Physics Teacher N. 37, S. 469-474
- PEICHL L. (1997): Die Augen der Säugetiere: Unterschiedliche Blicke in die Welt, Biologie in Unserer Zeit 27/2, S. 96-105
- PENZLIN H. (1996): Lehrbuch der Tierphysiologie, Stuttgart: Fischer
- PRENZEL M. (1995): Zum Lernen bewegen, Blick in die Wissenschaft 4 (7), S. 58-66
- RAUBER A.; Leonhardt H. (1978): Anatomie des Menschen, Band I, Stuttgart: Thieme
- RAUNER M. (2000): Physikalische Blätter, 56 (7/8), S. 7
- Rheinberg, 1989
- RHOADES R.; Tanner G. (1996): Fisiologia Medica, Neapel: EdiSES
- ROGER E. (1986): Wirbeltiere im Überblick, Heidelberg: Quelle und Meyer
- ROHEN T. W. (1995): Funktionelle Anatomie des Menschen, Stuttgart: Schattauer
- ROMER A. S.; Parson T. S. (1991): Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, Berlin: Parei
- ROSENTHAL E. (1995): Zu Motivation und Interesse für das Fach Physik, Physik in der Schule 33 (10), S. 343-346
- RÖSSLER R. D. (1985): Die Skiaskopie nicht-rotationssymmetrischer Brechungsanomalien, Dissertation, Bonn
- RÖBLER M.(2000): Visionen zum Physikunterricht, PdN-Physik 1/49, S. 36-38
- ROST et al. (1999): Struktur und Veränderung des Interesses an Physik bei Schülern der 6. bis 10. Klassenstufe, Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 31 (1), S. 18-31
- RÜDIGER W. (Hrsg.) (1988): Lehrbuch der Physiologie, Heidelberg: Hüthig Verlag
- SACHSENWEGER M. (1996): Laser contra Brille, Berlin: Gesundheit
- SCHAEFFEL F. (1998): Experimentelle Untersuchungen zur Entstehung von Fehlsichtigkeiten, PdN-Ph. 5/47
- SCHARF K.-H.; Schwarze H. (1995): Informationen zum Herz-Kreislauf-System, Praxis der Naturwissenschaften Physik 44/2, S. 9-14
- SCHETT A. (1996): The Ophthalmoscope (Der Augenspiegel), Oostende: Wayenborgh
- SCHIEFELE U. u.a. (1983): Zur Konzeption einer pädagogischen Theorie des Interesses, München: Inst. Für E. Pädagogik u. Pädag. Psychologie
- SCHIEFELE U. et al. (1993): Metaanalyse des Zusammenhangs von Interesse und schulischer Leistung, Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 25 (2), S. 120-148



- SCHLICHTING H. J. (1998); Rodewald B.: Leben im Wärmebad, PdN-Physik 37/5, S. 30-36
- SCHILLER A. (1995): Strömungsmechanik. Ein Praktikumsversuch für Medizinstudenten. PdN-Physik 44/2 S.15-22
- SCHMIDT F.; Thews G. (Hrsg.) (1997): Physiologie des Menschen, Berlin: Springer
- SCHMIDT-NIELSEN K. (1997): Animal Physiology: Adaptation and Environment, Cambridge University Press.
- SCHOBERT H. (1989): Orthopädie des Sitzen, Berlin: Springer-Verlag
- SCHUMACHER G. H. et al. (1990): Anatomie und Biochemie der Zähne, Stuttgart
- SEIB W. (1996): Physik für Mediziner, Weinheim
- SIEGENTHALER W. (Hrsg) (1994): Klinische Pathophysiologie, Stuttgart: Thieme
- SIEVERS K. (1999): Struktur und Veränderung von Physikinteressen bei Jugendlichen, Kiel: IPN
- STILBE A. (1994): Sporttauchen, Stuttgart: Nagelschmid
- STRAUB W. (1984): Augenspiegelkurs, München: Urban & Schwarzenberg Verlag
- STRAUB W.; Kroll P.; Küchle H. J. (Hrsg) (1995): Augenärztliche Untersuchungsmethoden, Stuttgart: Enke Verlag
- STRENGERS P. u. al. (1996): Blut: Von der Magie zur Wissenschaft, Heidelberg: Spektrum
- THEWS G.; Vaupel P. (1997): Vegetative Physiologie, Berlin: Springer
- THEWS G.; Mutschler E.; Vaupel P. (1999): Anatomie, Physiologie, Pathologie des Menschen, Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH
- TIPLER P.A. (1994): Physik, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag
- TODT E. (1978): Das Interesse, Stuttgart: Huber
- TODT E. (1985): Die Bedeutung der Schule für die Entwicklung der Interessen von Kindern und Jugendlichen, Unterrichtswissenschaft (Nr. 4), S. 362,376
- TODT E.; Händel B. (1988): Analyse der Kontextabhängigkeit von Physikinteressen, MNU 41/3, S. 137-140
- TODT E. (1991): Schülerempfehlungen für einen interessanten Physikunterricht, Vortrag gehalten auf der MNU-Tagung in Göttingen
- TODT E. (1993): Schülerempfehlungen für einen interessanten Physikunterricht, Naturwissenschaften im Unterricht-Physik Heft 3, S. 37-38; Heft 4, S. 37-40
- THOMAE H. (1965): Die Motivation des menschlichen Handelns, S. 136
- TRAUTWEIN A.; Kreibitz U.; Oberhausen E. (1987): Physik für Mediziner, Berlin: Walter de Gruyter.
- TRIBUTSCH H. (1980): Wie das Leben leben lernte, München: DTV
- TRUTNAU L. (1994): Krokodile, Magdeburg: Westarp-Wiss.
- ULICH D.; Jerusalem M. (1996): Interpersonale Einflüsse auf die Lernleistung. In: Weinert F. (Hrsg.), Physiologie des Unterrichts und der Instruktion (S. 186-187), Göttingen: Hogrefe
- VAN RENSBURG J. B. G. (1994): Mundbiologie, Berlin
- VELHAGEN K. (1972): Der Augenarzt, Band II, Leipzig: Thieme
- VOGT H. (1998): Zusammenhang zwischen Biologieunterricht und Genese von biologieorientiertem Interesse, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 4/1, S. 13-27
- VOGT H. et al. (1999): Unterrichtliche Aspekte im Fach Biologie, durch die Unterricht aus Schülersicht als interessant erachtet wird, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 5/3, S. 75-85
- WEGGE J. (1998): Lernmotivation, Informationsverarbeitung, Leistung, München: Waxmann
- WEINECK J. (1984): Sportanatomie, Ballingen: Perimed-spitta, Med. Verl. Ges.
- WIESNER H.; Engelhardt P.; Herdt D. (1996): Unterricht Physik, Band II: Optik, Köln: Aulis
- WIRHED R. (1994): Sport- Anatomie und Bewegungslehre, Stuttgart: Schattauer Verlag

- WOOLNOUGH B. E. (1994): Why students choose physics, or reject it, Physics Education Nr. 29, S. 368-374
- ZARB G. A. (Hrsg.) (1985): Physiologie und Pathologie des Kiefergelenks, Berlin: Quintessenz
- ZEITTER W. (1993): Herz- und Gefäßtöne, Praxis der Naturwissenschaften- Physik 42/5
- ZINK R. A. (1985): Ärztlicher Rat für Bergsteiger, Stuttgart: Thieme

# Lebenslauf

**NAME** Colicchia  
**VORNAME** Giuseppe  
**GEBURTSDATUM** 30.01.1955  
**GEBURTSORT** San Procopio (Italien)

**SCHULAUSBILDUNG**  
1969 → 1974 Abitur am Naturwissenschaftlichen Gymnasium

**STUDIUM**  
1974 → 1978 Diplom in Physik an der Universität Cosenza

**SPEZIALISIERUNG**  
1979 → 1981 Medizinische Physik an der Universität Mailand  
1983 → 1984 Informatik an der Universität Rom

**BERUFSPRÜFUNGEN**  
1984 Lehrbefähigung in Physikalischen Naturwissenschaften  
1996 Lehrbefähigung in Mathematik und Physik

**JAHRES-AUFBAUKURSE** (an der Universität Rom)  
1987 Didaktik der Naturwissenschaften  
1988 Planung und Organisation im medizinischen Betrieb  
1989 Beurteilungsmethoden in der Schule  
1990 Grundlagen der Didaktik  
1991 Ergänzungen zur experimentellen Didaktik  
1992 Elemente der Didaktik der Medien  
1994 Einsatz von Technologien im Unterricht  
1996 Didaktik der Orientierung

**BERUFSTÄTIGKEIT**  
1978 → 1997 Lehrer an der Oberstufe für Physik in Rom  
1997 → heute Doktorand an Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU - München

## Danksagung

Vor allem danke ich Prof. Dr. Dr. Wiesner, der mir ein Thema vorgeschlagen hat, bei dem ich einerseits gut meine langjährige Erfahrung als Lehrer einbringen konnte, andererseits aber auch die Möglichkeit hatte auf ein weites Wissenschaftsgebiet zurückzugreifen, um Themen mit lebensnahem Bezug auszuwählen. Es war mir somit möglich, interessante und nützliche Erkenntnisse unter verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten und mit Spaß zu lernen. Prof. Wiesner hat meine aufkeimenden Ideen aufgegriffen und mir in zahlreichen Diskussionen mit viel Geduld geholfen, sie weiter zu entwickeln.

Prof. Dr. R. Wodzinski danke ich für die Zusammenarbeit bei dem Thema Aneurysma und Dr. R. Müller bei dem Thema Skiaskopie. Dr. R. Berger danke ich dafür, dass er mir seine Erfahrung, die er auf dem Gebiet der medizinischen Physik und empirischen Interessenforschung gesammelt hat, weitergab. Meiner Frau Sigrid danke ich für die Hilfe bei der deutschen Fassung der Arbeit. LAssin A. Künzl danke ich für die weiteren Korrekturen, die zu einer noch besseren Verständlichkeit der Arbeit beigetragen haben, sowie für die Hilfe bei der Erprobung der Einheiten in der Schule. Frau M. Wondrak möchte ich meinen Dank für die Hilfe beim Bau der Modelle aussprechen.

Bei allen Mitarbeitern der Abteilung Physikdidaktik möchte ich mich herzlich für die häufige Hilfe und für das gute Arbeitsklima bedanken, so dass ich mich wie zu Hause fühlen konnte.

Dank auch an die Lehrerinnen und Lehrer, die die Unterrichtserprobung durchgeführt haben und an die zahlreichen Schülerinnen und Schüler, die – unbewusst - den empirischen Teil der Arbeit ermöglicht haben.

## **Eidesstattliche Versicherung**

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation abgesehen von der Beratung durch meine wissenschaftlichen Lehrer nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist. Sie hat weder ganz, noch zum Teil an einer anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegen.

München, im 2001

Giuseppe Colicchia